



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI KARAKTERISTIK REDUKSI GETARAN
TRANSLASI DAN ROTASI SISTEM UTAMA DAN
ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN OLEH
MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC
VIBRATION ABSORBER (CPVA) AKIBAT
KETIDAKSEIMBANGAN POSISI SUMBER GETAR
PADA SISTEM UTAMA.**

WISNU GILANG ROMADHON ARIFIYANTO
NRP. 2113100134

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI KARAKTERISTIK REDUKSI GETARAN
TRANSLASI DAN ROTASI SISTEM UTAMA
DAN ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN
OLEH MEKANISME CANTILEVER
PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER
(CPVA) AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN
POSISI SUMBER GETAR PADA SISTEM
UTAMA.**

Wisnu Gilang Romadhon Arifiyanto
2113100134

Dosen Pembimbing
DR. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TM141585

**STUDY OF REDUCTION CHARACTERISTIC
VIBRATION OF TRANSLATION AND
ROTATION OF MAIN SYSTEM AND THE
ELECTRIC ENERGY MADE BY CANTILEVER
PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER
(CPVA) MECHANISM CAUSED BY
UNBALANCED VIBRATION SOURCES.**

Wisnu Gilang Romadhon Arifiyanto
2113100134

Advisory Lecturer
DR. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

**STUDI KARAKTERISTIK REDUKSI GETARAN
TRANSLASI DAN ROTASI SISTEM UTAMA DAN
ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN OLEH
MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC
VIBRATION ABSORBER (CPVA) AKIBAT
KETIDAKSEIMBANGAN POSISI SUMBER GETAR
PADA SISTEM UTAMA.**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

WISNU GILANG ROMADHON ARIFIYANTO

NRP. 2113 100 134

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT
NIP. 197004121997032003 (Pembimbing)
2. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng.
NIP. 197505111999031001 (Penguji I)
3. Moch Solichin, ST, MT
NIP. 2100201405003 (Penguji II)
4. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT
NIP. 198907052015042005 (Penguji III)



SURABAYA

JULI, 2017

**STUDI KARAKTERISTIK REDUKSI GETARAN
TRANSLASI DAN ROTASI SISTEM UTAMA DAN
ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN OLEH
MEKANISME CANTILEVER PIEZOELECTRIC
VIBRATION ABSORBER (CPVA) AKIBAT
KETIDAKSEIMBANGAN POSISI SUMBER GETAR PADA
SISTEM UTAMA.**

Nama Mahasiswa : Wisnu Gilang Romadhon Arifiyanto
Nrp : 2113100134
Departemen : Teknik Mesin ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRAK

Semua mesin di industri yang bergerak akan menghasilkan getaran. Getaran tersebut dapat berupa getaran translasi maupun rotasi. Getaran yang berlebihan akan menyebabkan efektivitas mesin turun yang mengakibatkan mesin tersebut cepat rusak. Salah satu cara untuk mereduksi getaran berlebihan adalah dengan menggunakan Dynamic Vibration Absorber (DVA)[1]. Prinsip kerja dari Dynamic Vibration Absorber adalah penambahan massa absorber dan pegas pada sistem utama. DVA akan mereduksi getaran sistem utama dengan menghasilkan getaran yang arahnya berlawanan dengan arah getar dari sistem utama.

Penelitian tugas akhir ini telah dirancang dan disimulasikan sebuah mekanisme alat vibration absorber dan energi harvester dengan menggunakan metode Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) dalam skala laboratorium. Untuk melihat respon dari sistem utama, rancangan tersebut disimulasikan. Sistem utama yang digunakan pada penelitian ini adalah plat datar yang ditopang oleh empat pegas. Plat tersebut menerima gaya eksitasi dari pegas yang dihubungkan dengan massa eksentris motor DC yang diletakkan

di bawah plat tersebut. Eksitasi dari massa utama tersebut diteruskan menuju massa absorber yang dihubungkan dengan pegas. Eksitasi dari massa absorber dimanfaatkan oleh Cantilever piezoelectric untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Variasi yang digunakan adalah variasi posisi sumber getar, kecepatan motor, jumlah cantilever piezoelectric, dan letak CPVA.

Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan bahwa semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa maka frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar. Lalu semakin jauh pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa maka frekuensi natural baru yang terbentuk akan semakin besar, selain itu presentase reduksi respon yang dihasilkan akan semakin tinggi. Selanjutnya semakin banyak piezoelectric yang digunakan, maka respon perpindahan yang dihasilkan akan semakin tinggi. Dan voltase bangkitan yang direkomendasikan dan terbesar yang mampu dihasilkan oleh CPVA ini sebesar $1.483E-03$ volt dengan reduksi sebesar 95,37% yaitu saat CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa dengan penggunaan piezoelectric sebanyak 1400 buah

Kata Kunci : Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA), energy listrik, letak sumber getar, frekuensi, letak CPVA

**STUDY OF REDUCTION CHARACTERISTIC
VIBRATION OF TRANSLATION AND ROTATION OF
MAIN SYSTEM AND THE ELECTRIC ENERGY MADE
BY CANTILEVER PIEZOELECTRIC VIBRATION
ABSORBER (CPVA) MECHANISM CAUSED BY
UNBALANCED VIBRATION SOURCES.**

Student Name : Wisnu Gilang Romadhon Arifiyanto
Nrp : 2113100134
Departement : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRACT

All moving machines in the industry will produce vibrations. The vibration can be either translational or rotational. Excessive vibration will cause the effectiveness of the engine down which causes damage to the machine. One way to reduce excessive vibration is to use Dynamic Vibration Absorber (DVA). The working principle of Dynamic Vibration Absorber is by adding an absorber and spring in the main system. DVA will reduce the vibration of the main system by producing opposite direction of the vibration of the main system.

This final project has been designed and simulated a mechanism of vibration absorber and energy harvester by using Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) method in laboratory scale. To see the response of the main system, the design is simulated. The main system used in this research is a flat plate supported by four springs. The plates receive an excitation force from the spring that is connected to the eccentricity of the DC motor which placed under the plate. The excitation of the main mass is passed to the absorber mass which is connected to the spring. The excitation of the absorber mass is utilized by Cantilever piezoelectric to generate electrical energy by converting kinetic energy into electrical energy. The variations

in this research are the position of vibration source, motor speed, number of piezoelectric cantilever, and the location of CPVA.

From the simulation has been done, we obtained that the farther the shift of vibration source to the center of the mass, the first natural frequencies are formed larger. Then the farther the location of CPVA to the center of mass, the new natural frequencies are formed larger, in addition to the reduction percentage of response generated will be higher. Furthermore, the more piezoelectric used, the resulting displacement response will be higher. The recommended and largest generation voltage generated by CPVA is $9.228\text{E-}03$ volt with a reduction of 84.72%.

Keywords : Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA), Electrical Energy, The location of the vibration source, Frequency, CPVA's location

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang maha pengasih lagi maha penyayang, dengan puja dan puji syukur atas kehadiran-Nya, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan sesuai dengan apa yang diharapkan. Penulisan laporan tugas akhir ini dimaksudkan sebagai syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tugas akhir ini banyak pihak yang membantu. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW.
2. Bapak Muhyiddin Arifiyanto dan Ibu Siti Munawaroh selaku orangtua luar biasa bagi penulis yang selalu mendidik dan mendukung penulis dalam kondisi apapun hingga saat ini.
3. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST.,MT. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang selalu memberi arahan, petunjuk, dan selalu ada untuk penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr.Eng Harus Laksana Guntuk, ST.,M.Eng. Bapak M. Solichin, ST., MT, serta Ibu Aida Annisa Amin D,ST.,MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin ITS yang telah memimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis sejak mahasiswa baru hingga saat ini sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

6. Teman-teman yang ada di Teknik Mesin maupun yang ada di ITS yang sudah banyak memberikan kenangan yang sangat berharga selama berkuliah di ITS.
7. Mbak Rachma yang sudah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.
8. Keluarga besar Lab Vibrasi dan Sistem dinamis yang senantiasa menemani, menghibur, dan membantu penulis.
9. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan tugas akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Terdahulu	5
2.2. Teori Mekanika Getaran	13
2.2.1. Getaran Multi Dof	13
2.2.2. Base Motion.....	15
2.2.3. Dynamic Vibration Absorber	17
2.2.4. Piezoelectric.....	24
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1. <i>Flowchart</i> Penelitian.....	35
3.2. Penjelasan Tahap Pengerjaan Penelitian.....	37
3.2.1. Studi Literatur.....	37
3.2.2. Identifikasi Masalah	37
3.2.3. Perancangan Mekanisme Sistem Utama.....	38
3.2.4. Pemodelan Sistem Dinamis	40
3.2.5. Penurunan Persamaan Gerak	49
3.2.6. Pembuatan Blok Simulasi Matlab	49
3.2.7. Simulasi	50

3.2.8.	Reduksi Respon Sistem Utama dan Energi Density	50
3.2.9.	Analisa Hasil.....	51
3.2.10.	Kesimpulan	51
3.3.	Parameter Penelitian	51
3.3.1.	Frekuensi Operasi.....	53
3.3.2.	Koefisien Pegas Alat Uji dan Massa Absorber (K0 , K1 , K2 , K3).....	53
3.3.3.	Massa alat uji (M1)	54
3.3.4.	Massa absorber (M2)	54
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		55
4.1.	Perancangan	55
4.1.1.	Perancangan Sistem Utama Tanpa CPVA.....	55
4.1.2.	Perancangan Mekanisme Cantilever Piezoelectric	56
4.2.	Analisa Respon	57
4.2.1.	Analisa Respon Sistem Utama Tanpa CPVA.....	57
4.2.2.	Analisa Respon Sistem Utama Dengan CPVA dan Jumlah <i>Piezoelectric</i> Tetap.....	71
4.2.3.	Analisa Sistem Utama Dengan CPVA dan Posisi CPVA Tetap	93
4.3.	Analisa Energi Bangkitan	104
4.3.1.	Analisa Energi Bangkitan dengan Jumlah Piezoelectric Tetap	105
4.3.2.	Analisa Energi Bangkitan dengan Posisi CPVA tetap	108
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		115
5.1.	Kesimpulan	115
5.2.	Saran	116
DAFTAR PUSTAKA.....		119
LAMPIRAN		121
BIODATA PENULIS.....		125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pemodelan Sistem Mekanis Dengan <i>Dynamic Vibration Absorber</i> [5]	5
Gambar 2.2 Karakteristik Amplitudo Dan Frekuensi Sistem Mekanis Dengan <i>Dynamic Vibration Absorber</i> [5].....	6
Gambar 2.3 Mekanisme Sederhana Penelitian <i>Cantilever Piezoelectric Energy Harvesting</i>	7
Gambar 2.4 Skema Percobaan <i>Cantilever Piezoelectric Energy Harvesting</i>	7
Gambar 2.5 Grafik Voltase Bangkitan Terhadap Waktu : (a) Frekuensi 58 Hz (b) Frekuensi 437 Hz.....	8
Gambar 2.6 Model Dinamis Dari Sistem 2 DOF Tanpa Dual DVA-Independen (a) Dan Dengan Dual DVA-Independen (b)[2].....	9
Gambar 2.7 Pemodelan Dinamis Sistem 2 DOF Dengan Single DVA (a) Dan 3 DOF Dengan Menggunakan Dual DVA Yang Disusun Seri (b)[7].....	10
Gambar 2.8 Pemodelan Sistem Utama (A) Dan CPVA (B)[8] ..	12
Gambar 2.9 Grafik Jumlah <i>Piezoelectric</i> Optimum Terhadap	12
Gambar 2.10 Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan.....	14
Gambar 2.11 <i>Free Body Diagram</i> Multi Derajat Kebebasan	14
Gambar 2.12 Skema Base Motion Vibration.[9]	15
Gambar 2.13 (a) Grafik Hubungan <i>Amplitudo Ratio</i> Dengan <i>Frequency Ratio</i> , (b) <i>Phase Angle</i> Dengan <i>Frequency Ratio</i> .[9].....	17
Gambar 2.14 Pemodelan Dinamis DVA Tak Teredam[9].	18
Gambar 2.15 Efek Dari DVA Tak Teredam Terhadap Respon Dari Sistem Utama[9]	20
Gambar 2.16 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> .[9]	22
Gambar 2.17 Pengaruh Dari <i>Damped Vibration Absorber</i> Terhadap Respon Dari Sistem Utama.[9]	24
Gambar 2.18 Beberapa Contoh Bentuk <i>Piezoelectric</i> .[10]	25

Gambar 2.19 <i>Cantilever Piezoelectric</i> [10].....	29
Gambar 2.20 <i>Free Body Diagram</i> Dari Cantilever <i>Piezoelectric</i> [10].....	30
Gambar 2.21 Model pemanen energi kinetic menggunakan cantilever <i>piezoelectric</i> . [10]	31
Gambar 2.22 Rangkaian Listrik Pemanen Energi Kinetic[10]....	31
Gambar 2.23 Susunnnan Parallel Material <i>Piezoelectric</i>	32
Gambar 2.24 Konstanta Pegas Disusun Parallel.	33
Gambar 2.25 <i>Piezoelectric</i> Disusun Secara Seri.	33
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	37
Gambar 3.2 Pemodelan Sederhana Rancangan Sistem Utama....	38
Gambar 3.3 Pemodelan Sederhana Rancangan Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) Dengan Housing (a), Dan Tanpa Housing (b)	39
Gambar 3. 4 Model Analisa (a) Sistem Utama Sebagai Simulator Getaran Dan (b) CPVA.....	40
Gambar 3.5 Gambar Sistem Dinamis Dari Sistem Utama Tanpa CPVA	41
Gambar 3.6 Gambar Sistem Dinamis Dari Sistem Utama Dengan CPVA	42
Gambar 3.7 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Utama Tanpa CPVA...	43
Gambar 3.8 <i>Free Body Diagram</i> (1) Massa Absorber, (2) Massa Piezoelectric, Dan (3) Massa Utama Saat Sistem Utama Ditambah Dengan CPVA.	45
Gambar 3.9 Diagram Sirkuit Elektromagnetik <i>cantilever</i> <i>Piezoelectric</i>	48
Gambar 4.1 Rancangan Mekanisme Sistem Utama Sebagai Simulator Getaran.....	55
Gambar 4.2 Rancangan <i>Cantilever Piezoelectric Vibration</i> <i>Absorber</i> (CPVA) (a) Dengan Housing, (b) Dan Tanpa Housing.....	56
Gambar 4.3 Bode Diagram Sistem Utama Tanpa CPVA dengan a = 0.2 m.....	60

Gambar 4.4 Grafik Respon Perpindahan (a), Kecepatan (b), Dan Percepatan (c) Dari Massa Utama Tanpa CPVA.....	63
Gambar 4.5 Grafik Respon Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Posisi Sumber Getar Pada Frekuensi 38.16 Rad/s	64
Gambar 4.6 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA	65
Gambar 4.7 Grafik Respon Perpindahan Sudut (a), Kecepatan Sudut (b), Dan Percepatan Sudut (c) Dari Massa Utama Tanpa CPVA.....	67
Gambar 4.8 Grafik Respon Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Posisi Sumber Getar Pada Frekuensi 38.16 Rad/S.....	68
Gambar 4.9 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA dengan Variasi Frekuensi dan Posisi CPVA.....	70
Gambar 4.10 Rancangan Mekasnisme Sistem utama Dengan CPVA	71
Gambar 4.11 Bode Diagram Sistem Utama Dengan CPVA	76
Gambar 4.12 Grafik Respon Perpindahan (a), Kecepatan (b), Dan Percepatan (c) Dari Massa Utama Dengan CPVA	79
Gambar 4.13 Grafik Respon Perpindahan Dari Massa Utama Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.....	80
Gambar 4.14 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Dengan CPVA, Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA.....	81
Gambar 4.15 Grafik respon perpindahan sudut (a), Kecepatan sudut (b), dan percepatan sudut (c) dari massa utama dengan CPVA.....	83
Gambar 4.16 Grafik Respon Perpindahan Sudut Dari Massa Utama Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.....	84
Gambar 4.17 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Dengan CPVA, Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA	85

Gambar 4.18 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA	87
Gambar 4.19 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.	89
Gambar 4.20 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA	90
Gambar 4.21 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.	92
Gambar 4.22 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Dengan CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric	94
Gambar 4.23 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Dengan CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric.....	95
Gambar 4.24 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA	97
Gambar 4.25 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.	99
Gambar 4.26 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA	100
Gambar 4.27 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.	102
Gambar 4.28 Grafik Respon Energi Bangkitan Berupa Daya...	104
Gambar 4.29 Grafik Respon Daya Bangkitan Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.	105
Gambar 4.30 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA	107
Gambar 4.31 Grafik Respon Daya Bangkitan Dengan Variasi Jumlah CPVA Terhadap Pusat Massa.	109
Gambar 4.32 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric	110
Gambar 4.33 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi, Jumlah Piezoelectric, dan Posisi CPVA	112

Gambar 4.34 Grafik RMS Displacement Piezoelectric dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA	113
---	-----

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Energi Bangkitan, Displacement Dan Kapasitansi Pada Material <i>Piezoelectric</i>	27
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Beberapa Material <i>Piezoelectric</i>	28
Tabel 3.1 Parameter Sistem Utama	51
Tabel 3.2 Parameter Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA)	52
Tabel 3.3 Parameter Material Piezoelectric	52
Tabel 4.1 Frekuensi Natural Sistem Tanpa CPVA	60
Tabel 4.2 RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA	69
Tabel 4.3 Frekuensi Natural Sistem Utama dengan CPVA pada $a = 0.2 \text{ m}$	75
Tabel 4.4 Persentase Reduksi Respon Sistem Utama dengan CPVA	88
Tabel 4.5 Persentase Reduksi Respon Angular Sistem Utama dengan CPVA	92
Tabel 4.6 Persentase Reduksi Respon Sistem Utama dengan CPVA	98
Tabel 4.7 Persentase Reduksi Respon Angular Sistem Utama dengan CPVA	102
Tabel 4.8 Energi Bangkitan dengan Jumlah Piezoelectric Tetap	106
Tabel 4.9 Energi Bangkitan dengan Posisi CPVA Tetap	109

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Mesin di dunia industri saat ini sudah banyak membantu pekerjaan perusahaan. Semua mesin di industri yang bergerak akan menghasilkan getaran. Getaran tersebut dapat berupa getaran translasi maupun rotasi. Getaran yang berlebihan akan menyebabkan efektivitas mesin turun yang mengakibatkan mesin tersebut cepat rusak. Salah satu cara untuk mereduksi getaran berlebihan adalah dengan menggunakan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA). Prinsip kerja dari *Dynamic Vibration Absorber* adalah penambahan massa absorber dan pegas pada sistem utama. DVA akan mereduksi getaran sistem utama dengan menghasilkan getaran yang arahnya berlawanan dengan arah getar dari sistem utama.

DVA biasanya digunakan untuk mereduksi getaran yang terjadi pada sistem utama. Penelitian mengenai *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) sudah banyak dilakukan. Energi dari getaran yang berlebihan merupakan energi kinetik, karena memiliki kecepatan tertentu saat berosilasi[2]. Semakin besar getaran, maka energi kinetik yang dihasilkan akan semakin besar. Energi kinetik tersebut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan *Piezoelectric Cantilever*. Sehingga selain untuk mereduksi getaran, DVA juga dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan bantuan *Piezoelectric Cantilever*.

Penelitian tugas akhir ini telah dirancang dan disimulasikan sebuah mekanisme alat *vibration absorber* dan energi *harvester* dengan menggunakan metode *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) dalam skala laboratorium. Penggunaan CPVA pada penelitian ini disarankan karena getaran sistem utama yang dihasilkan secara translasi dan

rotasi yang disebabkan karena posisi sumber getar yang tidak di pusat massa[3]. Untuk melihat respon dari sistem utama, rancangan tersebut disimulasikan. Sistem utama yang digunakan pada penelitian ini adalah plat datar yang ditopang oleh empat pegas. Plat tersebut menerima gaya eksitasi dari pegas yang dihubungkan dengan massa eksentris motor DC yang diletakkan di bawah plat tersebut. Eksitasi dari massa utama tersebut diteruskan menuju massa absorber yang dihubungkan dengan pegas. Eksitasi dari massa *absorber* dimanfaatkan oleh *Cantilever piezoelectric* untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi kinetik menjadi energi listrik.

Penelitian ini dititikberatkan pada rancang bangun CPVA yang mampu mereduksi getaran arah translasi dan rotasi sekaligus mampu menghasilkan energi listrik[4]. Variasi yang digunakan adalah variasi dari kecepatan motor, jumlah *cantilever piezoelectric*, dan letak CPVA. Dari penelitian ini didapat pengaruh putaran motor, jumlah *cantilever piezoelectric*, dan letak CPVA terhadap reduksi getaran dari sistem utama serta energi bangkitan yang dihasilkan.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai mekanisme *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA). Dalam Tugas Akhir ini dilakukan beberapa rumusan masalah, antara lain:

1. Bagaimana rancangan sistem utama yang merepresentasikan getaran translasi dan rotasi?
2. Bagaimana rancangan *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) yang mampu mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik?

3. Bagaimana pengaruh kecepatan putar motor terhadap reduksi getaran dari sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap reduksi getaran dari sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan?
5. Bagaimana pengaruh posisi letak CPVA terhadap reduksi getaran sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan ?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Sumber getar didapat dari motor DC yang dihubungkan dengan pegas dan massa eksentris
2. Massa absorber dalam kondisi konstan
3. CPVA diletakkan berada pada satu sumbu horizontal.
4. Gerakan translasi yang diamati pada sumbu y plat datar.
5. Gerakan rotasi hanya terjadi satu sisi ke arah θ .
6. Sistem utama merupakan sistem terkopel.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan rancangan sistem utama yang merepresentasikan getaran translasi dan rotasi
2. Mendapatkan mekanisme *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) yang mampu mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik.
3. Mengetahui pengaruh kecepatan putar motor terhadap reduksi getaran dari sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan.
4. Mengetahui pengaruh jumlah cantilever piezoelectric terhadap reduksi getaran dari sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan

5. Mengetahui pengaruh letak CPVA terhadap reduksi getaran sistem dan energi bangkitan yang dihasilkan

1.5. Manfaat Penelitian

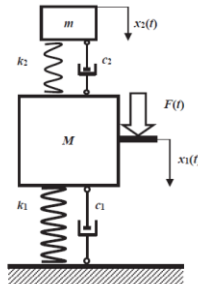
Penelitian ini merupakan pemanfaatan CPVA sebagai peredam getaran berlebih dan konverter getaran berlebih menjadi energi listrik. Penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan energi alternatif kedepannya dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*, sebagai energi harvesting dalam kasus peredaman getaran pada sistem multi DoF dengan arah translasi dan rotasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Tahun 2016 Marian Witalis Dorby[5] mengadakan penelitian untuk melihat seberapa besar energi yang dapat direduksi dengan menggunakan *dynamic vibration absorber*. Analisanya membutuhkan model dengan 2 dof. Pertama yang dilakukan adalah mereduksi respon dari massa M yang merupakan masa utama, lalu kedua yaitu pengurangan massa m dari DVA bersesuaian, dihubungkan dengan M dengan *damping element*. Getaran dihasilkan oleh gaya F yang diberikan ke massa M . Tujuan dari *absorber* adalah untuk meminimalkan amplitudo getaran dari sistem utama.



Gambar 2.1 Pemodelan Sistem Mekanis Dengan *Dynamic Vibration Absorber*[5]

Gambar 2.1 menunjukkan pemodelan sistem mekanis yang diselesaikan menggunakan software *MATLAB* dengan data seperti berikut:

$$M = 10 \text{ kg}$$

$$K_2 = 3948 \text{ N/m}$$

$$C_2 = 1.257 \text{ Ns/m}$$

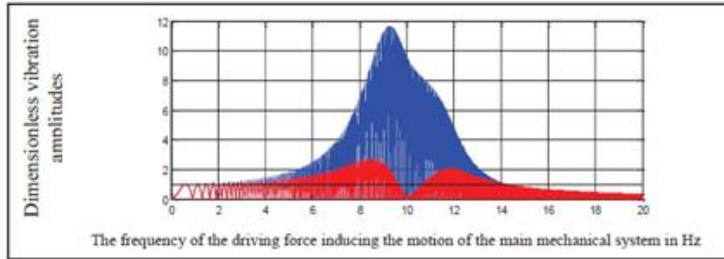
$$m = 1 \text{ kg}$$

$$K_1 = 3.948\text{E}+004 \text{ N/m}$$

$$C_1 = 252.6 \text{ Ns/m}$$

$$F(t) = 100 \sin [2\pi f(t)t]$$

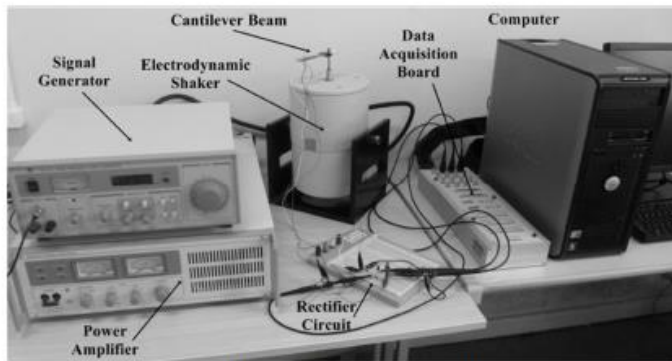
setelah itu didapatkan hasil seperti berikut



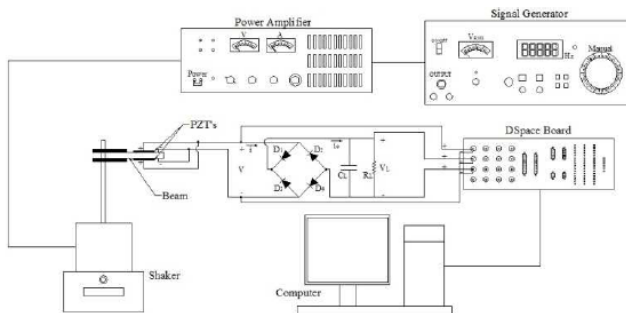
Gambar 2.2 Karakteristik Amplitudo Dan Frekuensi Sistem Mekanis Dengan Dynamic Vibration Absorber[5]

Analisa dari gambar 2.2 diatas menunjukkan getaran di sistem utama direduksi sebesar 89.3% dibandingkan dengan defleksi statis yang dihasilkan dengan gaya yang sama tanpa DVA.

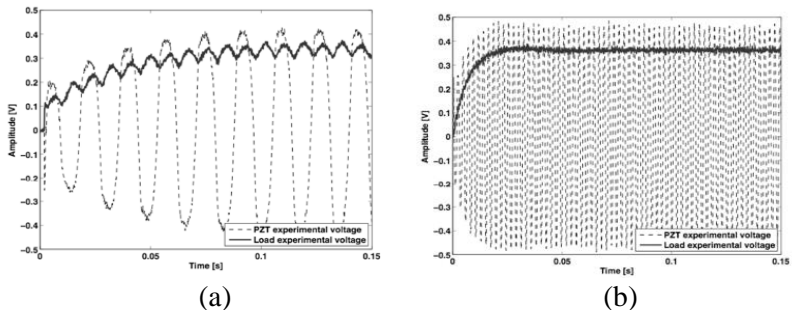
Tahun 2012, Samuel da Silva mengadakan suatu penelitian tentang karakteristik voltase bangkitan dari mekanisme *vibration energi harvesting* menggunakan material *cantilever piezoelectric* dengan variasi besarnya frekuensi eksitasi dari sumber getar. Material *piezoelectric* diletakkan pada sebuah *cantilever beam* dengan posisi frontal yang kemudian diberikan eksitasi getaran yang berasal dari sebuah *electrodynamic shaker*, seperti yang terlihat pada gambar 2.3 dan 2.4. Getaran *shaker* tersebut divariasikan frekuensinya dan kemudian akan diteruskan ke *cantilever beam* yang akan mengakibatkan material *piezoelectric* terdefleksi, dan kemudian menghasilkan voltase bangkitan yang dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.3 Mekanisme Sederhana Penelitian *Cantilever Piezoelectric* Energy Harvesting



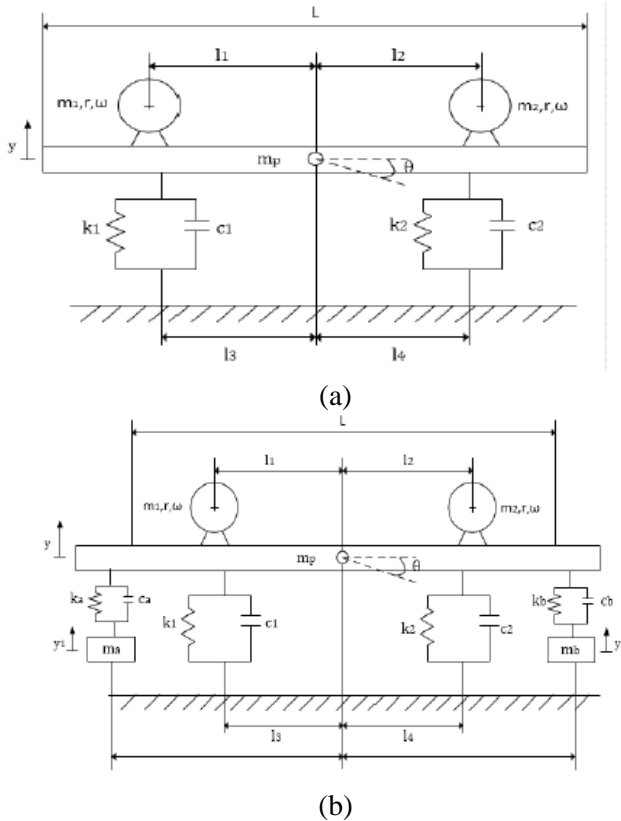
Gambar 2.4 Skema Percobaan *Cantilever Piezoelectric* Energy Harvesting



Gambar 2.5 Grafik Voltase Bangkitan Terhadap Waktu : (a) Frekuensi 58 Hz (b) Frekuensi 437 Hz

Dari gambar 2.5 diatas terlihat bahwa dengan semakin besarnya frekuensi sumber getar, maka voltase yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* akan semakin besar. Selain itu grafik yang dihasilkan oleh frekuensi yang tinggi menjadi lebih halus dibandingkan dengan grafik yang dihasilkan oleh frekuensi yang rendah.

Esthi Kusumadewayanti[2] melakukan penelitian yg berjudul pengaruh massa dan perubahan lengan momen *dual dynamic vibration absorber independent* terhadap sistem utama 2 dof. dalam penelitian ini penulis membuat model dinamis sistem 2 Dof menggunakan dua buah *dynamic vibration absorber* untuk dipelajari pengaruh massa dan perubahan lengan pada sistem tersebut. Model dinamis dari sistem tersebut berbentuk seperti gambar dibawah ini

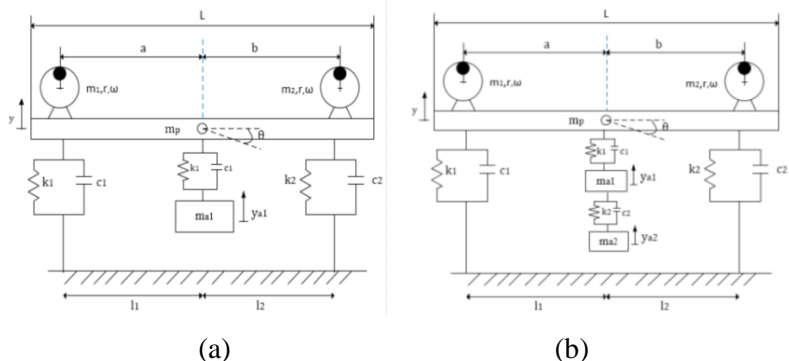


Gambar 2.6 Model Dinamis Dari Sistem 2 DOF Tanpa Dual DVA-Independen (a) Dan Dengan Dual DVA-Independen (b)[2]

Gambar 2.6 Menunjukkan Model dinamis yang disimulasikan menggunakan *Matlab*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *dual DVA-independent* dapat mereduksi getaran sistem maksimum sebesar 93.78% (rasio massa dan konstanta kekakuan 1/20) pada arah translasi dan 94.03% (rasio massa 1/20 dan rasio konstanta kekakuan 1/5) di ujung sistem pada arah rotasi. Penurunan getaran optimum sebesar 72.69% (rasio massa dan konstanta kekakuan 0.01967); 89.44% (rasio

massa $1/20$ dan rasio konstanta kekakuan 0.0561); dan 89.75% (massa $1/20$ dan rasio konstanta kekakuan 0.0474). Diketahui untuk sistem dengan penambahan DVA, rasio massa yang digunakan adalah $1/80$, $1/40$ dan $1/20$ dari massa sistem, dimana rasio konstanta kekakuan pegas sama dengan rasio massa. Pada setiap rasio massa 10 divariasikan posisi DVA sebesar 0.02 m, 0.13 m dan 0.26 m dengan jarak kedua DVA simetri terhadap pusat sistem.

Penelitian mengenai *Dynamic Vibration Absorber* juga dilakukan oleh Aini Lostari.[7] Dalam penelitiannya terdapat studi perbandingan pengaruh SDVA (*Single Dynamic Vibration Absorber*) dan DDVA (*Dual Dynamic Vibration Absorber*) yang tersusun seri pada sistem utama terhadap penurunan respon getarannya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Aini digunakan motor listrik dengan massa *unbalance* sebagai sumber eksitasi dan diletakkan di atas beam yang dijadikan sebagai pegas. Penelitian ini menggunakan metode simulasi dan diverifikasi menggunakan metode eksperimen. Rancangan sistem dinamis dari Aini dapat dilihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 Pemodelan Dinamis Sistem 2 DOF Dengan Single DVA (a) Dan 3 DOF Dengan Menggunakan Dual DVA Yang Disusun Seri (b)[7].

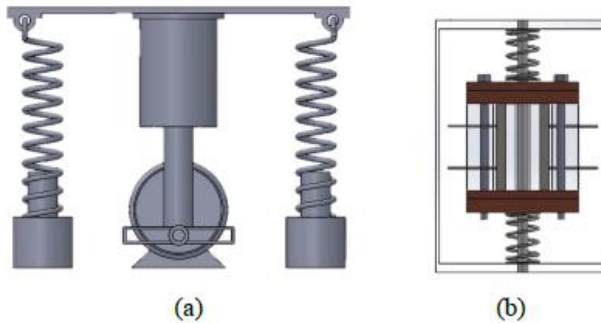
Dari model dinamik akan menghasilkan persamaan matematis yang akan diterjemahkan ke program Simulink *Matlab* dalam bentuk blok diagram. Proses simulasi berdasarkan time response yang dilakukan dengan eksitasi periodik. Eksitasi periodik dilakukan dengan beda fase 00. Frekuensi eksitasinya bervariasi pada 0 Hz sampai 30 Hz dan juga divariasikan massa *absorber* yaitu 1/10, 1/20, dan 1/40. Hal ini dilakukan untuk melihat respon *displacement* yang mampu mereduksi getaran yang dihasilkan dari sistem SDVA dan DDVA seri.

Pada penelitian didapatkan respon getaran yang mampu mereduksi pada SDVA dengan massa absorber 1/10, 1/20 dan 1/40 menghasilkan getaran pada rasio frekuensi sama dengan 1, namun masing-masing massa *absorber rms displacement* yang dihasilkan sebesar 0.0001206 m, 0.0002436 m, dan 0.0007506 m. Sedangkan DDVA dengan massa absorber $Ma_1=1/20$ dan $Ma_2=1/20$, $Ma_1=2/30$ dan $Ma_2=1/30$, dan $Ma_1=3/40$ dan $Ma_2=1/40$ menghasilkan getaran pada rasio frekuensi sama dengan 1, namun masing-masing massa *absorber rms displacement* yang dihasilkan sebesar 0.001484 m, 0.002691 m, dan 0.001343 m. Sehingga pada kasus SDVA dan DDVA, tipe DVA yang mampu mereduksi getaran berlebih pada sistem dengan frekuensi tunggal secara optimum adalah SDVA. Sedangkan pada DDVA kemampuan massa *absorber* 1 dalam mereduksi getaran massa utama berkurang karena adanya massa *absorber* 2.

Tahun 2016, Wahyu Rachma E[8] melakukan pemodelan tentang reduksi respon getaran translasi pada sistem utama dan energy yang dihasilkan oleh mekanisme DVA metode CPVA. Dalam penelitian ini penulis merancang sebuah CPVA yang dapat mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik yang disimulasikan pada sistem utama. Variasi jumlah *cantilever piezoelectric* yang penulis gunakan sebanyak 2600, 2800, dan 3000 buah. Berikut adalah parameter dan mekanisme utama dan CPVA yang penulis rancang:

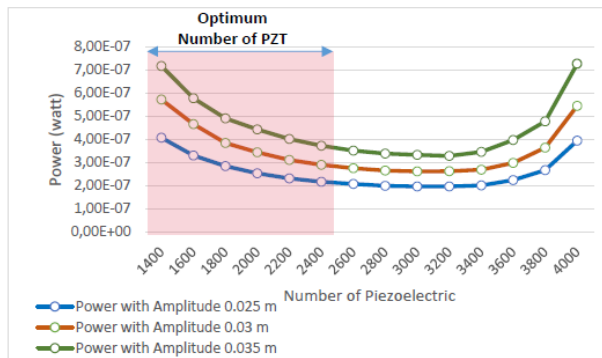
M1 : 4kg
K1 : 600N/m

K_2 : 600N/m
 C_1 : 17.88 N.s/m
 M_{abs} : 0.02 kg
 K_{abs} : 500N/m



Gambar 2.8 Pemodelan Sistem Utama (A) Dan CPVA (B)[8]

Gambar 2.8 (a) merupakan sistem utama dan sebagai simulator getaran, sedangkan gambar 2.8 (b) merupakan rancangan CPVA yang digunakan pada penelitian ini. Selanjutnya dilakukan simulasi dan menghasilkan grafik dibawah ini.



Gambar 2.9 Grafik Jumlah *Piezoelectric* Optimum Terhadap Daya Bangkitan *Piezoelectric*. [8]

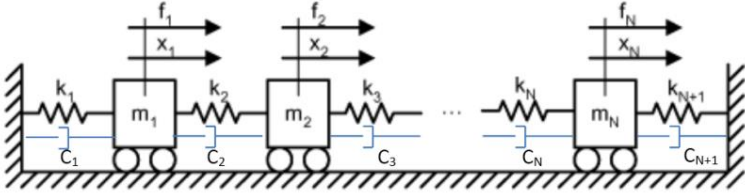
Setelah disimulasikan didapatkan hasil seperti gambar 2.9 diatas, dapat dilihat energi bangkitan yang dihasilkan oleh variasi jumlah *piezoelectric* dengan variasi amplitudo. Jumlah *piezoelectric* yang optimal berada dikisaran angka 1400-2400 buah dengan nilai $2,00\text{E-}07$ W sampai $4,00\text{E-}07$ W untuk amplitudo 0.025m, $2,95\text{E-}07$ W sampai $5,80\text{E-}07$ W untuk amplitudo 0.03m, dan $3,85\text{E-}07$ W sampai $7,10\text{E-}07$ W untuk amplitudo 0.035m.

2.2. Teori Mekanika Getaran

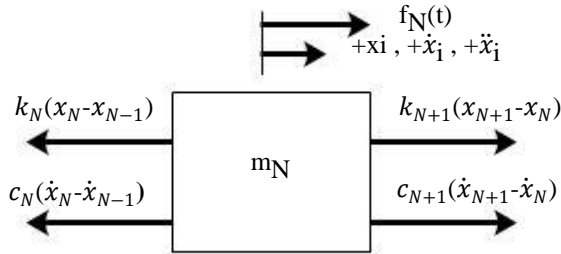
Secara umum getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan berulang dalam interval waktu tertentu yang melewati titik kesetimbangan. Getaran dari sebuah sistem melibatkan transfer energi antara energi potensial dan energi kinetik. Jika sistem tersebut teredam, maka beberapa energi tersebut terdisipasi ke setiap siklus getar. Getaran dibagi menjadi dua kelompok umum, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Setiap komponen yang memiliki massa dan pegas berarti memiliki frekuensi natural. Frekuensi natural inilah yang akan mempengaruhi respon getaran dari suatu sistem. Perhitungan frekuensi natural biasanya dilakukan dengan mengasumsikan tidak ada redaman maupun gaya eksternal.

2.2.1. Getaran Multi Dof

Sistem getaran dengan multi derajat kebebasan (MDOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak (n) arah koordinat bebas. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10 Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan



Gambar 2.11 Free Body Diagram Multi Derajat Kebebasan

Untuk analisa multi derajat kebebasan dapat dilihat pada gambar 2.11. Persamaan gerak dari sistem diatas untuk massa m_N dapat disederhanakan menjadi:

$$m_N \ddot{x}_N - c_N \dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1}) \dot{x}_N - c_{N+1} \dot{x}_{N+1} - k_N x_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) x_N - k_{N+1} x_{N+1} = F_N(t)$$

Persamaan (2.14) dapat digambarkan dengan metode matriks sehingga didapatkan

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\}$$

dengan M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_N \end{bmatrix}$$

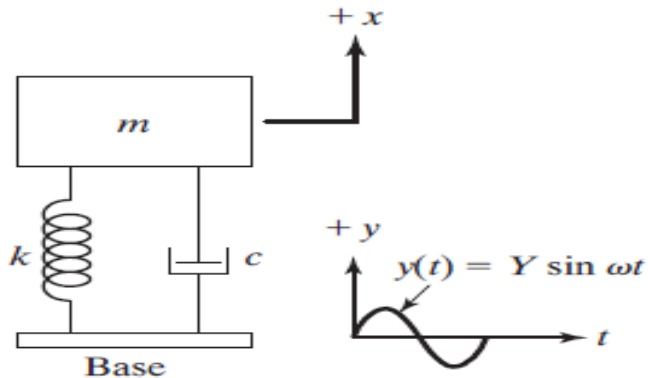
$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_N & (c_N + c_{N+1}) \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N & (k_N + k_{N+1}) \end{bmatrix}$$

(2.5)

2.2.2. Base Motion

Getaran mekanik yang terjadi terhadap gerakan dasar atau *base motion vibration* merupakan getaran yang terjadi karena adanya pergerakan harmonis dari *base* suatu sistem yang mempengaruhi massa di atasnya. Skema *base motion vibration* ditunjukkan pada gambar 2.12 di bawah ini.



Gambar 2.12 Skema Base Motion Vibration.[9]

Dari gambar 2.12 diatas maka didapat bentuk persamaan gerak yaitu:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \quad (2.6)$$

Dari persamaan 2.6 di atas, didapat respon *steady state* massa terhadap *base motion* $y(t)$ yaitu:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{[(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha)$$

Dengan

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{k-m\omega^2} \right) \quad (2.8)$$

Menggunakan persamaan trigonometri, persamaan 2.8 di atas dapat dibentuk menjadi sebagai berikut

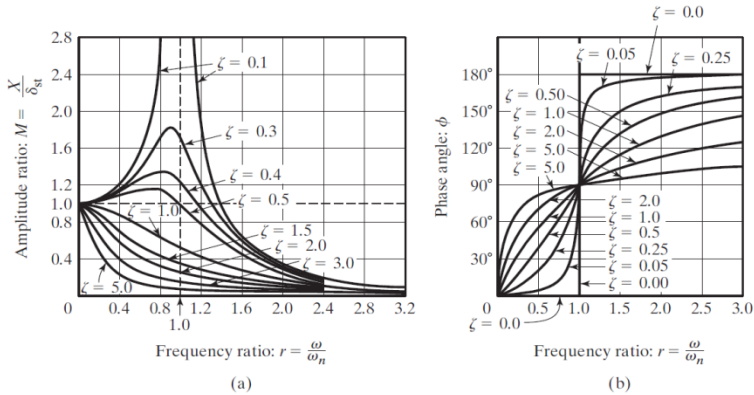
$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.9)$$

Dengan

$$\frac{X}{Y} = [(k^2 + (c\omega)^2) / ((k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2)]^{1/2} \quad (2.10)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{mc\omega^3}{k(k-m\omega^2)+(c\omega)^2} \right) \quad (2.11)$$

Dimana $\frac{X}{Y}$ adalah *displacement transmissibility*. Dari fenomena *base motion* didapat grafik hubungan *amplitude ratio* dan *phase angle* dengan *frequency ratio* yang dapat dilihat pada gambar 2.13 di bawah.



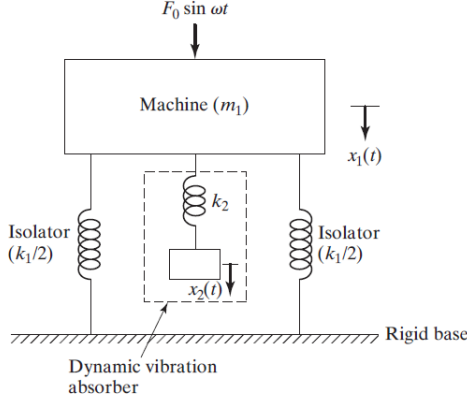
Gambar 2.13 (a) Grafik Hubungan *Amplitudo Ratio* Dengan *Frequency Ratio*, (b) *Phase Angle* Dengan *Frequency Ratio*. [9]

2.2.3. Dynamic Vibration Absorber

Dynamic Vibration Absorber (DVA) merupakan sistem tambahan yang terdiri dari massa *absorber* dan pegas yang berfungsi untuk mereduksi atau menghilangkan getaran yang tidak diinginkan. Dibutuhkan massa tambahan yang diberikan di massa utama yang berguna untuk menyerap getaran berlebih dari massa utama. Pemberian massa *absorber* pada massa utama ini menghasilkan sistem dengan 2 DOF, sehingga sistem tersebut akan memiliki dua frekuensi natural. DVA umumnya digunakan pada mesin yang beroperasi pada kecepatan konstan secara kontinu, karena getaran DVA cocok pada satu frekuensi tertentu. Oleh karena itu DVA hanya akan efektif digunakan pada mesin yang rentang frekuensi operasinya sempit. DVA dapat menyerap berbagai arah eksitasi, hal ini bergantung pada komponen dan mekanisme DVA yang menyesuaikan dengan arah eksitasi dari sistem utama. Tanpa adanya DVA, getaran yang berlebihan pada sistem utama akan sangat sulit dikontrol.

2.2.3.1. Undamped Dynamic Vibration Absorber

Permodelan sederhana dari sistem utama yang dipasangi DVA tidak teredam dapat dilihat pada Gambar 2.14 dibawah ini



Gambar 2.14 Pemodelan Dinamis DVA Tak Teredam[9].

Free body diagram dari pemodelan di gambar 2.14 adalah

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) &= F_0 \sin \omega t \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dengan mengasumsikan solusi harmonik, maka

$$x_j(t) = X_j \sin \omega t, \quad j = 1, 2$$

Sehingga amplitudo *steady state* dari m_1 dan m_2 adalah

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2\omega^2)F_0}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - k_2^2} \quad (2.13)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - k_2^2} \quad (2.14)$$

Untuk membuat amplitudo m_1 nol maka *numerator* dari persamaan 2.13 harus sama dengan nol. Persamaannya menjadi

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (2.15)$$

Massa utama tanpa DVA memiliki resonansi natural $\omega^2 \cong \omega_1^2 = k_1/m_1$. Jadi *absorber* didesain agar memiliki frekuensi natural sama dengan frekuensi natural massa utama, sehingga persamaannya menjadi

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (2.16)$$

Amplitudo getaran mesin akan nol apabila beroperasi pada frekuensi resonansi dengan mendefinisikan menjadi

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1} \quad \omega_1 = \left(\frac{k_1}{m_1} \right)^{1/2}$$

Sebagai frekuensi natural sistem utama, dan

$$\omega_2 = \left(\frac{k_2}{m_2} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

Sebagai frekuensi natural *absorber*. Sehingga persamaan 2.13 dan 2.14 dapat ditulis kembali menjadi

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.18)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.19)$$

Gambar 2.15 menunjukkan variasi amplitudo getaran (X_1/δ_{st}) dengan kecepatan (ω/ω_1). Dua puncak sesuai dengan dua frekuensi natural dari sistem. Sudah terlihat sebelumnya,

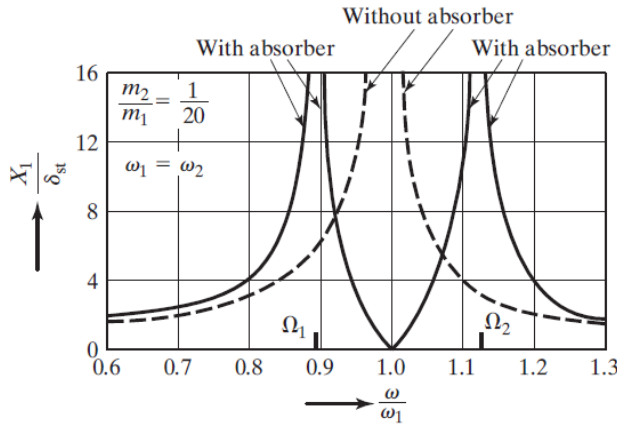
$X_1 = 0$ di $\omega = \omega_1$. Pada frekuensi ini, persamaan 2.19 memberikan

$$X_2 = -\frac{k_1}{k_2}\delta_{st} = -\frac{F_0}{k_2} \quad (2.20)$$

Hal ini menunjukkan bahwa gaya pegas berlawanan dengan eksitasi dan mereduksi gaya eksitasi di ($k_2 X_2 = -F_0$) dan di netralisasi. Dimensi dari DVA didapatkan melalui persamaan 2.20 dan 2.16 yaitu

$$k_2 X_2 = m_2 \omega^2 X_2 = -F_0 \quad (2.21)$$

Sehingga nilai dari k_2 dan m_2 tergantung dari nilai X_2 yang diperbolehkan



Gambar 2.15 Efek Dari DVA Tak Teread Terhadap Respon Dari Sistem Utama[9]

Pada gambar 2.15 penambahan DVA menghasilkan adanya dua frekuensi natural dari sistem, sehingga terdapat Ω_1 dan Ω_2 dapat diperoleh dengan membuat *denominator* persamaan 2.18 menjadi nol, mengingat bahwa

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{k_2 m_2 m_1}{k_1 m_1 k_1} = \frac{m_2 (\omega_2)^2}{m_1 (\omega_1)^2} \quad (2.22)$$

Sehingga persamaan 2.18 menjadi

$$\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^4 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 \left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right] + 1 = 0 \quad (2.23)$$

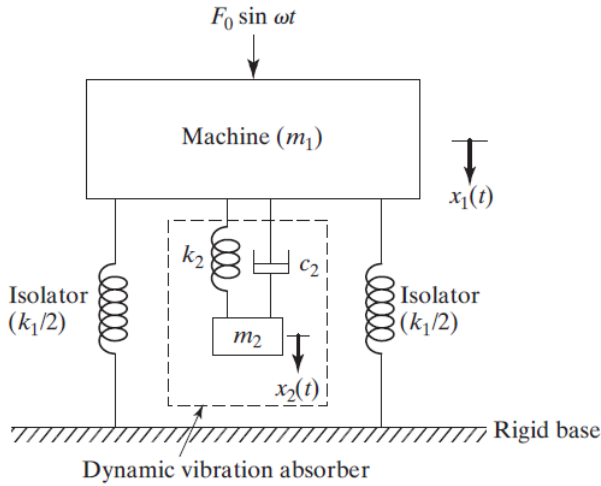
Akar persamaan 2.23 adalah

$$\left\{\left(\frac{\Omega_1}{\omega_2}\right)^2\right\} = \frac{\left\{\left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right] \mp \left\{\left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right] - 4 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right\}^{1/2}\right\}}{2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad (2.24)$$

Dimana persamaan 2.24 merupakan fungsi dari (m_2/m_1) dan (ω_2/ω_1) .

2.2.3.2. Damped Dynamic Vibration Absorber

Dynamic Vibration Absorber yang telah dijelaskan sebelumnya selain menghilangkan puncak resonansi pada grafik respon sistem utama, tapi juga menghasilkan dua puncak baru. Sehingga mesin mengalami amplitudo yang besar saat di puncak pertama selama start-up dan stopping. Amplitudo dari sistem utama ini dapat direduksi dengan menambahkan *damped dynamic vibration absorber* seperti yang terlihat pada Gambar 2.16 ini



Gambar 2.16 Damped Dynamic Vibration Absorber.[9]

Berdasarkan gambar 2.16 diatas didapatkan persamaan gerak dari massa X_1 dan X_2 adalah sebagai berikut:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.25)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.26)$$

Dengan mengasumsikan penyelesaian harmonik, maka :

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2.27)$$

Sehingga diperoleh amplitude *steady state* dari X_1 dan X_2 adalah sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{F_0 (k_2 - m_2 \omega^2 + i c_2 \omega)}{[(k_1 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - m_2 k_2 \omega^2] + i \omega c_2 (k_1 - m_1 \omega^2 - m_2 \omega^2)} \quad (2.28)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{(k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2)} \quad (2.29)$$

Dimana :

$\mu = m_2/m_1$ = Mass ratio = Absorber mass/main mass

$\delta_{st} = F_0/k_1$ = Static deflection of the system

$\omega_{\alpha^2} = k_2/m_2$ = Square of natural frequency of the absorber

$\omega_{\alpha^2} = k_1/m_1$ = Square of natural frequency of main mass

$f = \omega_a/\omega_n$ = Ratio of natural frequencies

$g = \omega/\omega_n$ = Forced frequency ratio

$cc = 2m\omega_n$ = Critical damping constant

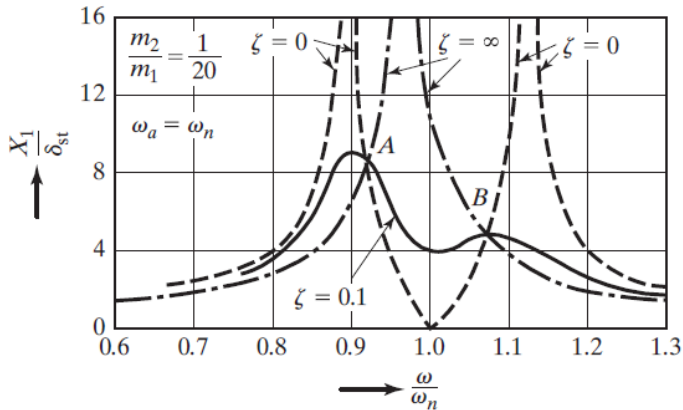
$\zeta = c_2/c_c$ = Damping ratio

Sehingga nilai X_1 dan X_2 dapat dinyatakan dalam:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^2 \quad (2.30)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^2 \quad (2.31)$$

Persamaan 2.30 menunjukkan nilai amplitudo getaran dari massa utama yang merupakan fungsi dari μ, f, g dan ζ . Grafik dari $\left| \frac{X_1}{\delta_{st}} \right|$ terhadap *forced frequency ratio* (g) ditunjukkan pada gambar 2.11 dengan nilai $f = 1$, $\mu = \frac{1}{20}$ dan variasi ζ adalah 0, 0.1, dan ∞ .



Gambar 2.17 Pengaruh Dari *Damped Vibration Absorber* Terhadap Respon Dari Sistem Utama.[9]

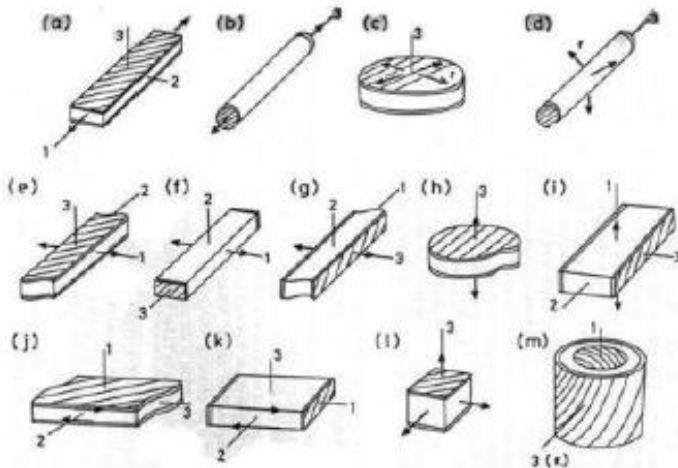
Dari grafik pada gambar 2.17 diatas, diketahui ketika redaman sama dengan nol ($\zeta = 0$), maka resonansi terjadi pada dua frekuensi natural yang tidak teredam dari sistem. Ketika redaman tidak terhingga ($\zeta = 0$), kedua massa utama dan massa absorber bekerja bersamaan sehingga seolah-olah sistem menjadi SDOF. Sedangkan saat redaman bernilai tertentu ($\zeta = 0.1$), puncak dari X_1 bernilai minimum.

2.2.4. Piezoelectric

Piezoelectric adalah suatu material yang biasanya terbuat dari kristal batuan, keramik, termasuk tulang dan polimer yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik. Potensial listrik ini merupakan respon dari material *piezoelectric* yang diberi tegangan dengan cara ditekan. Nilai koefisien muatan *piezoelectric* berada pada rentang 1–100 pico coulomb/Newton.

2.2.4.1. Karakteristik *Piezoelectric*

Efek *piezoelectric* terjadi jika medan listrik terbentuk ketika material dikenai tekanan mekanik. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi. Fenomena tersebut dikenal dengan *electrostriction*. Material *piezoelectric* memiliki berbagai jenis yang dibedakan menurut bentuk, sifat mekanik, fungsi, material yang digunakan, energi bangkitan dan faktor lain yang mempengaruhi kinerjanya. Beberapa bentuk dan macam macam dari *piezoelectric* dapat dilihat pada gambar 2.18.

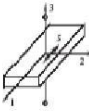
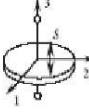
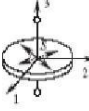
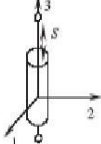
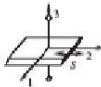


Gambar 2.18 Beberapa Contoh Bentuk *Piezoelectric*. [10]

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam *piezoelectric* itu sendiri. Ketika material *piezoelectric* tersebut dikenai gaya eksternal atau mengalami defleksi, maka jarak antar partikel akan berubah. Perubahan jarak

antar partikel tersebut menyebabkan munculnya beda potensial yang disebut dengan *Pull-in Voltage*. Besar dari *Pull-in Voltage* dipengaruhi oleh besarnya energi mekanik yang diterima material *piezoelectric*, jenis material, dan kapasitansi material. Karakteristik energi bangkitan dari material *piezoelectric* dapat dilihat di dalam Tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Energi Bangkitan, Displacement Dan Kapasitansi Pada Material *Piezoelectric*

Action Mode (L , length; W , width; T , thickness; D diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, ΔL (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}}{W} F$	$\Delta l = \frac{d_{31}}{T} V$	$C = \frac{\epsilon_3^T L W}{T}$
			
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4T}$
			
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{T} V$	$C = \frac{\pi K_j^T D^2}{4T}$
			
Longitudinal mode: $L > 3D$	$V = \frac{4L}{\pi D^2 g_{33}} F$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi D^2}{4L} K_j^T \epsilon_0$
			
Thickness shear mode: $W > 5T, L > 5T$	$V = \frac{g_{15}}{W} F$	$\Delta x = d_{15} V$	$C = \frac{LW}{T} K_1^T \epsilon_0$
			

Note: F is the force and ϵ_3^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_j^T is relative dielectric constant ($K_j^T = \epsilon_j^T / \epsilon_0$), and ϵ_0 is dielectric permittivity in vacuum.

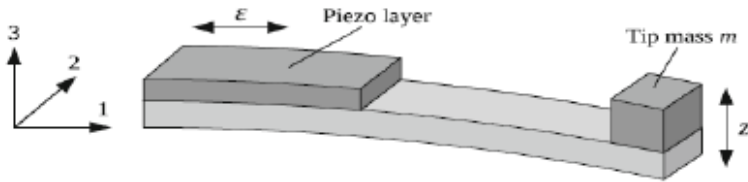
Energi bangkitan akan berbeda tergantung dari bentuk *piezoelectric*, besarnya energi bangkitan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezoelectric* yang dipilih. Energi bangkitan juga dipengaruhi oleh energi atau usaha mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric*. Berikut merupakan tabel yang menunjukkan sifat mekanik untuk beberapa material *piezoelectric*.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Beberapa Material *Piezoelectric*

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO3
Density	103 kg/m ³	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	$\varepsilon/\varepsilon_0$	12	1200	1700
d_{31} Constant	(10-12) C/N	23	110	78
g_{31} Constant	(10-3) Vm/N	216	10	5
k_{31} Constant	% at 1 KHz	12	30	21
Acoustic Impedance	(106) kg/m ³ .sec	2.7	30	30

2.2.4.2. Cantilever Piezoelectric

Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai sebagai pegas dengan bentuk *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya. Defleksi yang terjadi adalah dari arah 3 atau searah dengan sumbu z, dan regangan yang terjadi adalah pada arah satu atau pada arah sumbu x, sedangkan gaya yang diterima oleh *piezoelectric* adalah pada arah 3 atau pada arah sumbu z. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.19 berikut.



Gambar 2.19 *Cantilever Piezoelectric*[10]

2.2.4.3. Piezoelectric Voltage Constant

Piezoelectric voltage constant, g , merupakan medan listrik yang dibangkitkan oleh material *piezoelectric* per unit tegangan mekanik yang diberikan, atau regangan mekanik yang ditunjukkan oleh material *piezoelectric* per unit perpindahan listrik yang diberikan.

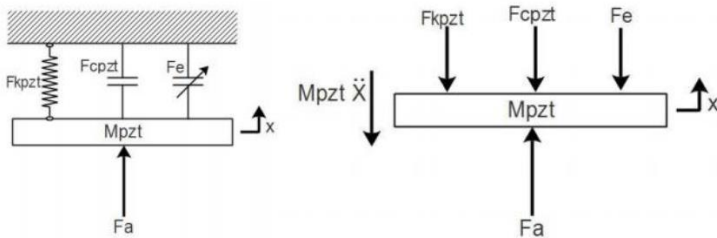
2.2.4.4. Electromechanical Coupling Factor

Electromechanical coupling factor, k , merupakan indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. *Electromechanical coupling factor*, k , disertai dua buah subscript, dimana dalam hal *direct effect subscript* pertama menunjukkan arah energi listrik yang dihasilkan dan *subscript* kedua menunjukkan arah dari energi mekanik yang diberikan. Nilai k tergantung pada spesifikasi yang diberikan oleh supplier keramik, yang merupakan nilai maksimum secara teoritis. Pada frekuensi rendah, elemen *piezoelectric* keramik tertentu dapat mengubah 30% - 75% dari energi yang diberikan padanya ke bentuk lain tergantung pada komposisi material *piezoelectric* dan arah pembebanan yang diberikan. Nilai k tinggi mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan *dielectric losses* atau *mechanical losses*. Ketelitian pengukuran efisiensi ditentukan berdasar pada rasio konversi energi (rasio energi yang dihasilkan dengan energi yang diterima). Berdasar pada pengukuran tersebut, elemen

piezoelectric dengan desain sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi mencapai 90%.

2.2.4.5. Material Piezoelectric

Ketika suatu gaya luar diberikan pada material *piezoelectric* maka material *piezoelectric* tersebut akan mengalami defleksi. Untuk mendapatkan persamaan gerak dari material *piezoelectric* maka perlu dianalisa free body diagram seperti ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 *Free Body Diagram* Dari Cantilever *Piezoelectric*[10].

Keseimbangan Gaya:

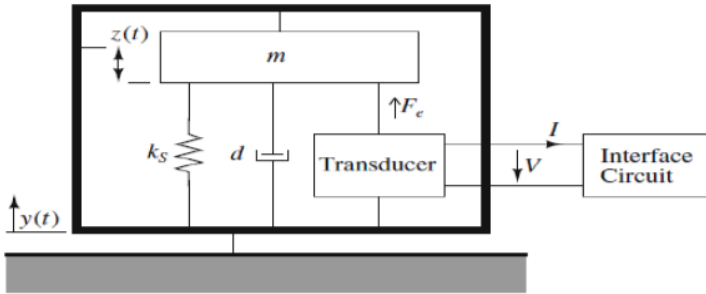
$$\begin{aligned} F_a &: M_{pzt} \cdot \ddot{x} + F_{c_{pzt}} + F_{k_{pzt}} + F_e \\ F_a(t) &: M_{pzt} \ddot{x}(t) + C_{pzt} \dot{x}(t) + K_{pzt} x(t) + \Theta V_p(t) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Keterangan:

- F_a : gaya eksitasi (N)
- M_{pzt} : massa *piezoelectric* (kg)
- C_{pzt} : damping dari *cantilever beam* (N.s/m)
- K_{pzt} : konstanta pegas *piezoelectric* (N/m)
- Θ : *coupling factor*

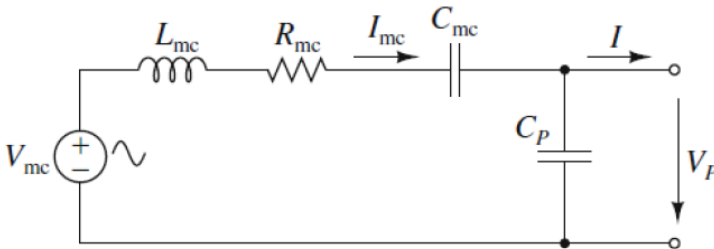
Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas yang diberikan gaya harmonis. Susunan massa pegas

tersebut dilengkapi dengan rangkaian elektrik pemanen energi. Model tersebut dapat dilihat pada gambar 2.21



Gambar 2.21 Model pemanen energi kinetik menggunakan cantilever *piezoelectric*. [10]

Dari gambar 2.21 di atas maka didapatkan rangkaian listrik ekuivalen yang sesuai. Rangkaian listrik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.22



Gambar 2.22 Rangkaian Listrik Pemanen Energi Kinetik [10]

Persamaan rangkaian listrik pada gambar 2.22 diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.33)$$

Dengan:

$$V_{mc} = \frac{Fi}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2}$$

$$C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p} \quad \Gamma = \sqrt{k_{31}k_p k_c}$$

Dimana:

F_i : Gaya lendutan dari eksitasi (N)

M : Massa (kg)

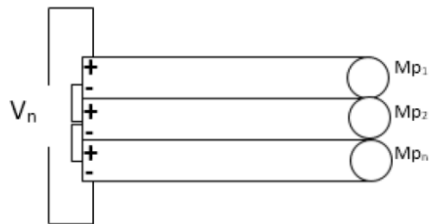
d_p : Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)

k_p : Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)

C_p : Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

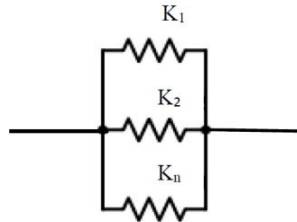
2.2.4.6. Susunan Piezoelectric

Piezoelectric dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* yang bergantung dari bentuk susunan dari *piezoelectric* tersebut. Susunan material *piezoelectric* secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.23



Gambar 2.23 Susunan Parallel Material *Piezoelectric*.

Karena *piezoelectric* disusun secara paralel, maka konstanta pegas dari material *piezoelectric* juga akan disusun secara paralel seperti yang terlihat pada gambar 2.24 Sehingga material *piezoelectric* yang disusun secara paralel akan memiliki sifat mekanik sebagai berikut:



Gambar 2.24 Konstanta Pegas Disusun Parallel.

Untuk satu material *piezoelectric*

$$F_k = K \cdot x$$

(2.34)

Untuk *piezoelectric* yang disusun secara parallel dengan jumlah n

$$F_k = K_{eq} \cdot X$$

(2.35)

Dengan : $K_{eq} = n \cdot K$

Untuk keseluruhan jumlah massa M_p dapat dirumuskan dengan:

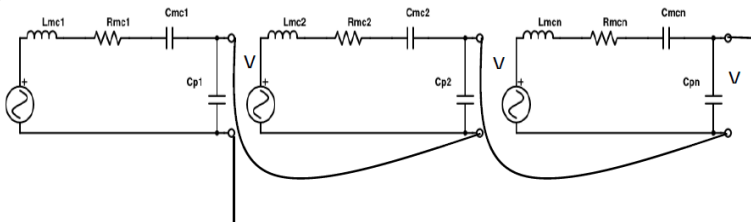
$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

Atau

$$M_{eq} = n \cdot M$$

(2.36)

Selanjutnya, tinjauan elektris untuk susunan material *piezoelectric* secara seri dapat dilihat seperti gambar 2.25

Gambar 2.25 *Piezoelectric* Disusun Secara Seri.

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

$$V_n = V_{p_1} + V_{p_2} + \dots + V_{p_n} \quad (2.37)$$

Jika $V_{p_1} = V_{p_2} = V_{p_n}$, maka :

$$V_n = n.V_1 \quad (2.38)$$

Arus yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

$$I_n = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.39)$$

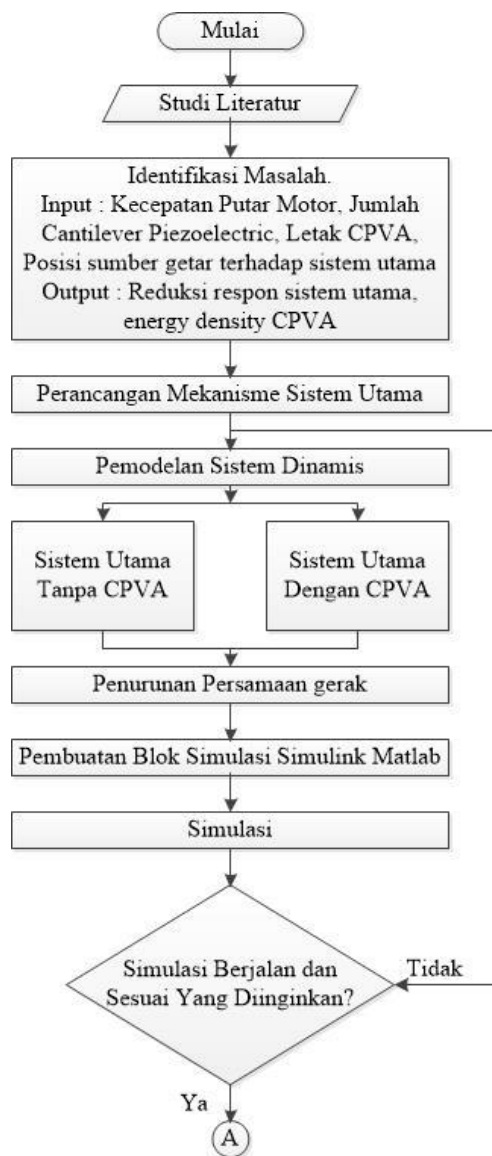
Dari rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun *piezoelectric* secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan untuk arus yang dihasilkan akan tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

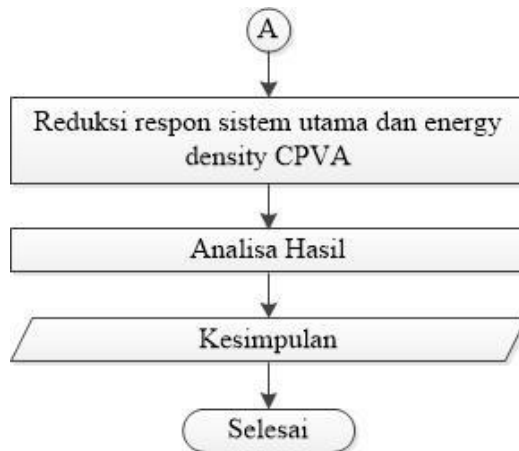
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem utama dan *energy density* dari CPVA. Berikut adalah diagram alir yang menunjukkan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan.





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.2. Penjelasan Tahap Pengerjaan Penelitian

3.2.1. Studi Literatur

Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan studi literatur, mempelajari tentang getaran *multi degree of freedom*, mempelajari tentang *dynamic vibration absorber*, mempelajari penggunaan matlab Simulink untuk menunjang penelitian, dan mempelajari tentang *piezoelectric* khususnya *cantilever piezoelectric*. Sumber literatur berasal dari buku dengan penulis yang jelas, penelitian yang pernah dilakukan, dan jurnal ilmiah.

3.2.2. Identifikasi Masalah

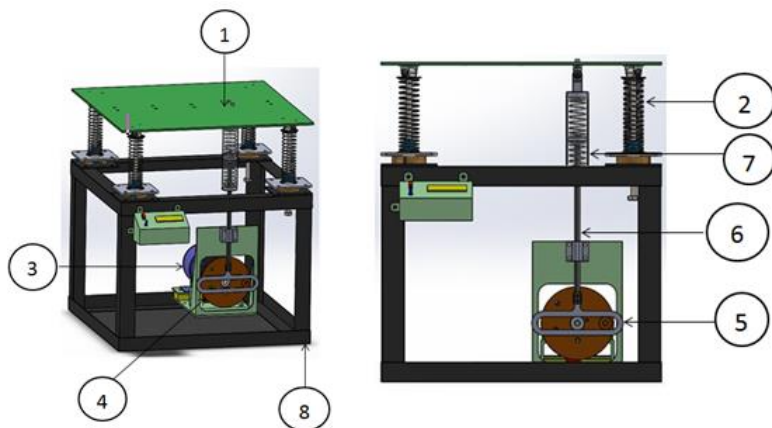
Langkah selanjutnya yaitu mengidentifikasi masalah yang ada. Masalah yang diidentifikasi pada penelitian ini ada dua, yaitu input dan output. Input yang diberikan berupa variasi kecepatan putar motor, jumlah *piezoelectric* yang digunakan, letak CPVA yang digunakan dan posisi sumber getaran yang tidak berada di *Center of Gravity*. Sedangkan output yang

dihasilkan dari penelitian ini adalah respon sistem utama dan jumlah energi yang dapat dihasilkan dari CPVA.

3.2.3. Perancangan Mekanisme Sistem Utama

Sistem utama pada penelitian ini adalah plat datar yang ditumpu oleh empat pegas. Plat tersebut menerima gaya eksitasi dari pegas yang dihubungkan dengan massa eksentrik pada motor DC yang diletakkan dibawahnya. Posisi sumber getar diletakkan tidak seimbang dalam 1 sumbu horizontal, sehingga memungkinkan plat bergerak translasi dan rotasi.

Gambar 3.2 dibawah merupakan rancangan pemodelan sistem dinamis dari penelitian yang akan dilakukan.



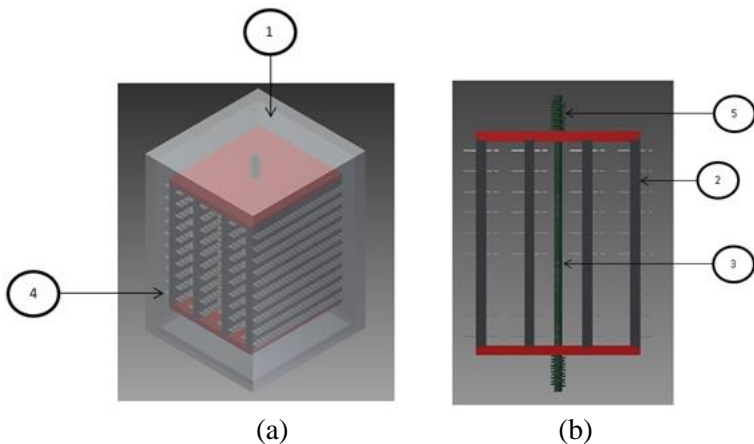
Gambar 3.2 Pemodelan Sederhana Rancangan Sistem Utama

Keterangan :

1. Plat
2. Pegas dan batang pengarah
3. Motor DC
4. Massa eksentrik
5. Slot massa eksentrik
6. Batang penggerak

7. Pegas penggerak
8. Kerangka alat pengujian

Gambar 3.2 merupakan rancangan sistem utama yang memiliki dimensi panjang 50 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 80cm. Komponen utama pada sistem utama ini adalah motor DC yang dirakit dengan massa eksentrik sebagai sumber getaran, pegas, plat datar dan beberapa komponen penunjang lainnya. Plat datar tersebut ditopang oleh empat pegas, dan menerima gaya eksitasi dari pegas yang dihubungkan dengan massa eksentris motor DC yang diletakkan di bawah plat tersebut. Eksitasi dari massa utama tersebut diteruskan menuju massa absorber yang dihubungkan dengan pegas. Eksitasi dari massa *absorber* dimanfaatkan oleh *Cantilever piezoelectric* untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi kinetik menjadi energi listrik.



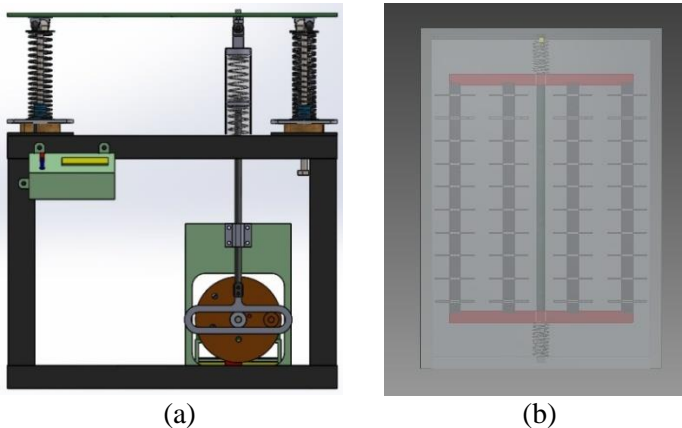
Gambar 3.3 Pemodelan Sederhana Rancangan Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA) Dengan Housing (a), Dan Tanpa Housing (b)

Keterangan :

1. *Housing* CPVA

2. Massa absorber
3. Batang pengarah
4. Cantilever Piezoelectric
5. Pegas absorber

Gambar 3.3 merupakan rancangan sistem CPVA yang terdiri dari *housing*, pegas, massa absorber, material *piezoelectric*, dan tiang pengarah eksitasi massa absorber. CPVA ini memiliki dimensi asli berupa panjang 22 cm, lebar 21 cm, dan tinggi 30 cm yang dapat menampung sebanyak 1760 buah material *piezoelectric*. Analisa yang dilakukan pada penelitian ini di sumbu y sistem utama dan CPVA. Sehingga didapatkan pegas ekuivalen sisi kiri dan kanan yang mewakili pegas dari sistem utama seperti yang terlihat pada gambar 3.4(a) dibawah. Sedangkan sistem CPVA dianalisa dari tampak depan seperti gambar 3.4(b) dibawah ini.

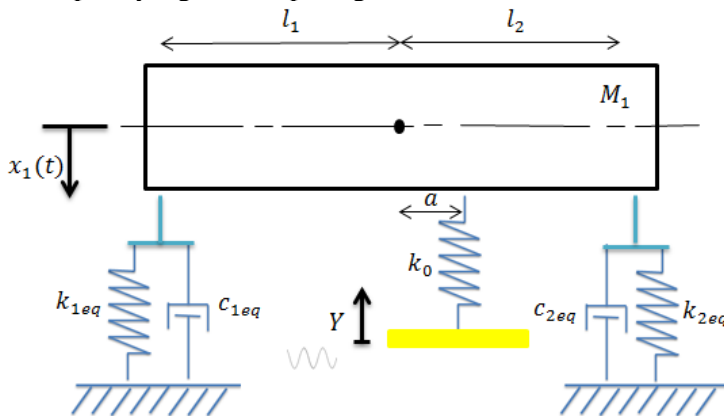


Gambar 3. 4 Model Analisa (a) Sistem Utama Sebagai Simulator Getaran Dan (b) CPVA

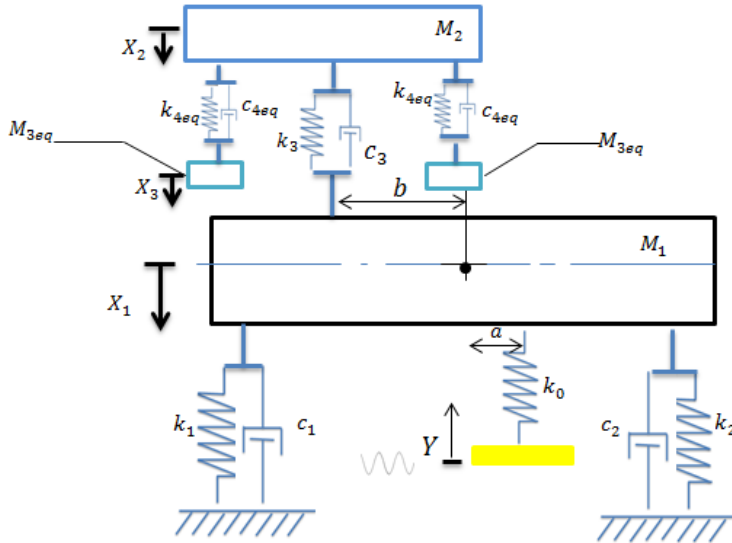
3.2.4. Pemodelan Sistem Dinamis

Pemodelan sistem dinamis dari penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu pemodelan sistem utama tanpa penambahan

CPVA dan pemodelan sistem utama disertai penambahan CPVA dengan jumlah piezoelectric tertentu. Pemodelan sistem utama disederhanakan dengan menggunakan sumbu vertikal sebagai arah displacement, sehingga pegas dari massa utama yang diidentifikasi hanya berjumlah dua buah seperti yang terlihat pada gambar 3.5 dibawah. Sedangkan untuk pemodelan sistem CPVA, digunakan ekuivalensi massa dan koefisien pegas dari piezoelectric karena perpindahan dan arah eksitasinya dianggap sama seperti yang terlihat pada gambar 3.6 dibawah.



Gambar 3.5 Gambar Sistem Dinamis Dari Sistem Utama Tanpa CPVA



Gambar 3.6 Gambar Sistem Dinamis Dari Sistem Utama Dengan CPVA

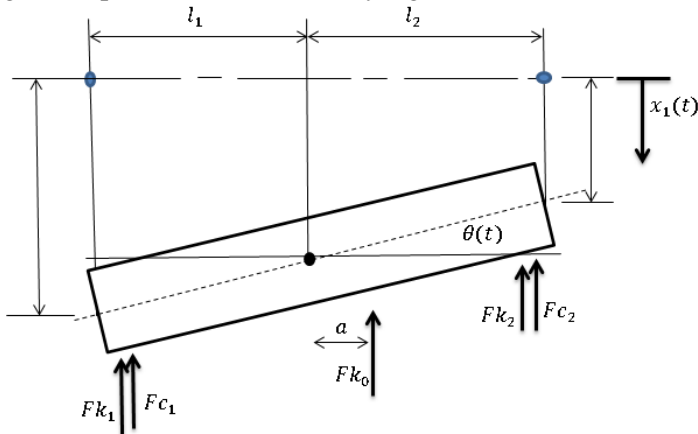
Keterangan :

- M_1 : Massa Sistem Utama
- M_2 : Massa Absorber
- M_3 : Massa Piezoelectric
- X_1 : Displacement massa 1
- X_2 : Displacement massa 2
- X_3 : Displacement massa 3
- Y : Amplitudo dari masa eksentrik
- K_0 : Koefisien pegas dari masa eksentrik menuju massa 1
- K_{1eq} : Koefisien pegas 1 dan 3 di massa 1
- K_{2eq} : Koefisien pegas 2 dan 4 di massa 1
- K_3 : Koefisien pegas 3 di massa 2
- K_{4eq} : Koefisien pegas 4 di massa 3
- C_1 : Koefisien redaman 1 di massa 1
- C_2 : Koefisien redaman 2 di massa 1

- C_3 : Koefisien redaman 3 di massa 2
 L_1 : Jarak dari titik pusat ke pegas 1
 L_2 : Jarak dari titik pusat ke pegas 2
 a : Jarak dari titik pusat ke sumber getar

3.2.4.1. Pemodelan Sistem Utama

Gambar 3.7 dapat dilihat vektor-vektor gaya yang bekerja pada M_1 yang merupakan free body diagram dari massa sistem utama (M_1). Displacement yang terjadi massa sistem utama tersebut yaitu translasi dan rotasi terjadi karena disebabkan pergeseran posisi sumber eksitasi yang diberikan sebesar L_2 .



Gambar 3.7 *Free Body Diagram* Sistem Utama Tanpa CPVA

Keterangan :

- Fk_0 : Gaya harmonic dari massa eksentrik (N)
 Fk_1 : Gaya reaksi dari pegas 1 (N)
 Fc_1 : Gaya reaksi dari peredam 1 sistem utama (N)
 Fk_2 : Gaya reaksi dari pegas 2 (N)
 Fc_2 : Gaya reaksi dari peredam 2 sistem utama (N)
 L_1 : Jarak dari titik pusat ke pegas 1 (m)
 L_2 : Jarak dari titik pusat ke pegas 2 (m)

a : Jarak pergeseran sumber getar (m)

X_1 : *Displacement* dari massa utama (m)

Dari gambar 3.7 Dapat dibuat persamaan matematis sistem utama tanpa CPVA sebagai berikut:

Persamaan gerak translasi sistem utama

$$\begin{aligned}\sum F &= M_1 \ddot{X}_1 \\ -Fk_1 - Fk_2 - Fc_1 - Fc_2 - Fk_0 &= M_1 \ddot{X}_1 \\ -k_1(x_1 + \theta_1 l_1) - c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 l_1) - k_2(x_1 - \theta_1 l_2) - \\ c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) - k_0(x_1 - y) &= M_1 \ddot{X}_1 \\ -k_1(x_1 + \theta_1 l_1) - c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 l_1) - k_2(x_1 - \theta_1 l_2) - \\ c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) + k_0 y - k_0(x_1 - \theta_1 a) &= M_1 \ddot{X}_1 \\ M_1 \ddot{X}_1 + k_1(x_1 + \theta_1 l_1) + c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 l_1) + k_2(x_1 - \theta_1 l_2) + \\ c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) - k_0 y + k_0(x_1 - \theta_1 a) &= 0 \\ M_1 \ddot{X}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 + (k_1 + k_0 + k_2)x_1 + (k_1 l_1 - k_2 l_2 - \\ k_0 a)\theta_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2)\dot{\theta}_1 &= k_0 y\end{aligned}$$

Persamaan gerak rotasi sistem utama

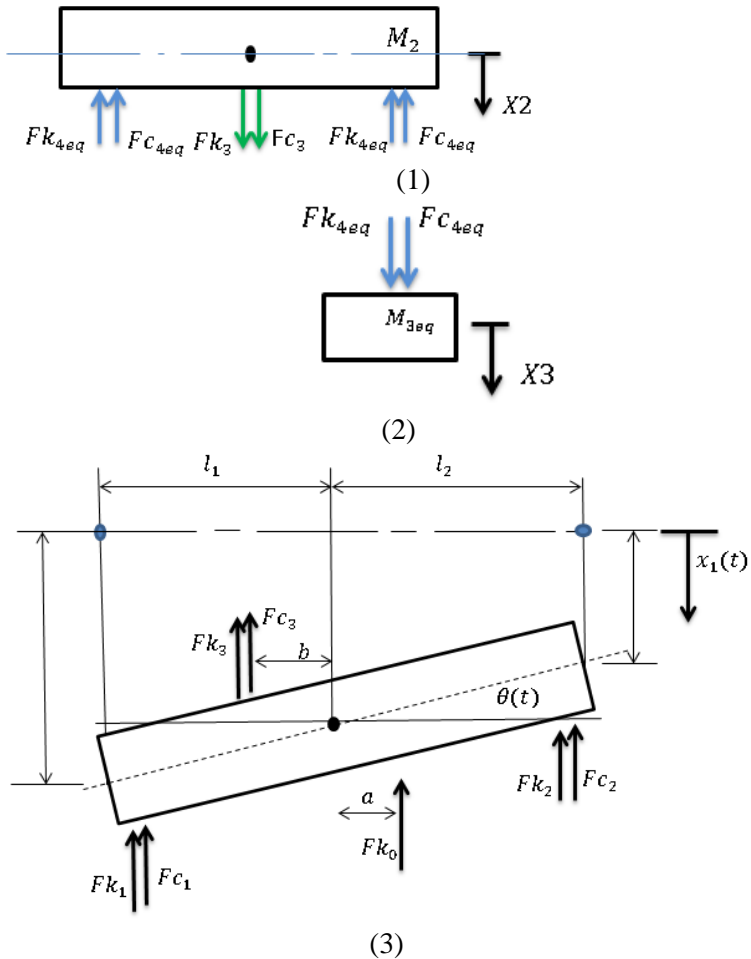
$$\begin{aligned}\sum M &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\ -Fk_1 \cdot l_1 - Fc_1 \cdot l_1 + Fk_2 \cdot l_2 + Fc_2 \cdot l_2 + Fk_0 \cdot a &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\ -(k_1(x_1 + \theta_1 l_1))l_1 - (c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 l_1))l_1 + (k_2(x_1 - \theta_1 l_2))l_2 + \\ (c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2))l_2 - (k_0(x_1 - y))a &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2)\dot{x}_1 + (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_0 a)x_1 + (k_1 l_1^2 - \\ k_2 l_2^2 + k_0 a^2)\theta_1 + (c_1 l_1^2 - c_2 l_2^2)\dot{\theta}_1 &= -k_0 y \cdot a\end{aligned}$$

3.2.4.2. Pemodelan Sistem Utama dengan Cantilever

Piezoelectric

Gambar 3.8 dibawah ini merupakan free body diagram sistem utama yang sudah ditambah dengan cantilever piezoelectric vibration absorber (CPVA). Gambar 3.8(1) merupakan FBD massa utama (M_1) yang dipengaruhi oleh pegas dari massa absorber (Fk_3). Gambar 3.8(2) merupakan FBD massa cantilever piezoelectric yang sudah diekuivalenkan. Gambar 3.8(3) merupakan FBD massa utama (M_1) yang sudah

dipengaruhi pegas (Fk_3) dan cantilever piezoelectric yang sudah diekuivalenkan.



Gambar 3.8 Free Body Diagram (1) Massa Absorber, (2) Massa Piezoelectric, Dan (3) Massa Utama Saat Sistem Utama Ditambah Dengan CPVA.

Keterangan:

- Fk_0 : Gaya harmonic dari massa eksentrik (N)
 Fk_1 : Gaya aksi reaksi dari pegas 1 (N)
 Fk_2 : Gaya aksi reaksi dari pegas 2 (N)
 Fk_3 : Gaya aksi reaksi dari pegas absorber (k3) (N)
 Fk_4 : Gaya aksi reaksi dari piezoelectric (N)
 Fc_1 : Gaya reaksi dari peredam 1 sistem utama (N)
 Fc_2 : Gaya reaksi dari peredam 2 sistem utama (N)
 Fc_3 : Gaya redaman dari absorber (N)
 Fc_4 : Gaya redaman dari kapasitansi piezoelectric (k3) (F)
 X_1 : Displacement dari massa utama (m)
 X_2 : Displacement dari massa absorber (m)
 X_3 : Displacement dari massa piezoelectric (m)
 a : Jarak pergeseran sumber getar (m)
 b : Jarak pergeseran letak CPVA (m)

Dari analisa gaya pada gambar 3.8 dapat dibuat persamaan matematis sebagai berikut:

Persamaan gerak translasi sistem utama

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= M_1 \ddot{X}_1 \\
 -Fk_1 - Fc_1 - Fk_2 - Fc_2 - Fk_3 - Fc_3 - Fk_0 &= M_1 \ddot{X}_1 \\
 -k_1(x_1 + \theta l_1) - c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta} l_1) - k_2(x_1 - \theta_1 l_2) - \\
 c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) - k_3(x_1 - x_2) - c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_0(x_1 - y) &= \\
 M_1 \ddot{X}_1 \\
 -k_1(x_1 + \theta l_1) - c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta} l_1) - k_2(x_1 - \theta_1 l_2) - \\
 c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) - k_3(x_1 + \theta_1 b) + k_3 x_2 - c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 b) + c_3 \dot{x}_2 + \\
 k_0 y - k_0(x_1 - \theta_1 a) &= M_1 \ddot{X}_1 \\
 M_1 \ddot{X}_1 + k_1(x_1 + \theta l_1) + c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta} l_1) + k_2(x_1 - \theta_1 l_2) + \\
 c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2) + k_3(x_1 + \theta_1 b) - k_3 x_2 + c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 b) - c_3 \dot{x}_2 - \\
 k_0 y + k_0(x_1 - \theta_1 a) &= 0 \\
 M_1 \ddot{X}_1 + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_0) x_1 + \\
 (k_1 l_1 - k_2 l_2 + k_3 b - k_0 a) \theta_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2 + c_3 b) \dot{\theta}_1 - k_3 x_2 - \\
 c_3 \dot{x}_2 &= k_0 y
 \end{aligned}$$

Persamaan gerak rotasi sistem utama

$$\begin{aligned}
 \sum M &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\
 -Fk_1 \cdot l_1 - Fc_1 \cdot l_1 + Fk_2 \cdot l_2 + Fc_2 \cdot l_2 - Fk_3 \cdot b - Fc_3 \cdot b + \\
 Fk_0 \cdot a &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\
 -(k_1(x_1 + \theta_1 l_1))l_1 - (c_1(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 l_1))l_1 + (k_2(x_1 - \theta_1 l_2))l_2 + \\
 (c_2(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1 l_2))l_2 - (k_3(x_1 - x_2))b - (c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2))b - \\
 (k_0(x_1 - y))a &= J_1 \ddot{\theta}_1 \\
 J_1 \ddot{\theta}_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2 + c_3 b) \dot{x}_1 + (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_0 a + k_3 b) x_1 + \\
 (k_1 l_1^2 - k_2 l_2^2 + k_0 a^2 + k_3 b^2) \theta_1 + (c_1 l_1^2 - c_2 l_2^2 + c_3 b^2) \dot{\theta}_1 - \\
 K_3 b \cdot x_2 - c_3 b \cdot \dot{x}_2 &= -k_0 y \cdot a
 \end{aligned}$$

Persamaan gerak massa absorber

$$\begin{aligned}
 \sum F &= M_2 \ddot{X}_2 \\
 Fk_3 + Fc_3 - Fk_{4eq} - Fc_4 &= M_2 \ddot{X}_2 \\
 k_3(x_1 + \theta_1 b) - k_3 x_2 + c_3(\dot{x}_1 + \dot{\theta}_1 a) - c_3 \dot{x}_2 - k_{4eq}(x_2 - \\
 x_3) - \Gamma \cdot n \cdot V_p &= M_2 \ddot{X}_2 \\
 k_3 x_1 + k_3 \theta_1 b - k_3 x_2 + c_3 \dot{x}_1 + c_3 \dot{\theta}_1 b - k_{4eq} x_2 + k_{4eq} x_3 - \\
 \Gamma \cdot n \cdot V_p &= M_2 \ddot{X}_2 \\
 M_2 \ddot{X}_2 - c_3 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_2 - k_3 x_1 + (k_3 + k_{4eq}) x_2 - k_{4eq} x_3 - \\
 k_3 \theta_1 b - c_3 \dot{\theta}_1 b + \Gamma \cdot n \cdot V_p &= 0
 \end{aligned}$$

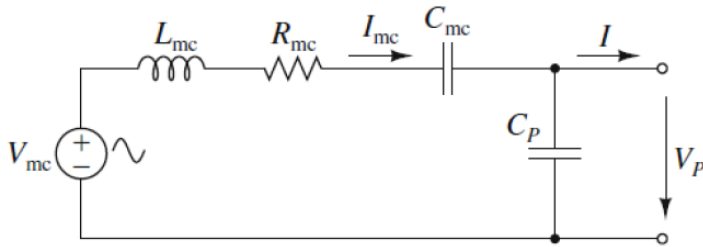
Persamaan gerak massa piezoelectric

$$\begin{aligned}
 \sum F &= M_{3eq} \ddot{X}_3 \\
 Fk_{4eq} + Fc_4 &= M_{3eq} \ddot{X}_3 \\
 k_{4eq}(x_2 - x_3) + \Gamma \cdot n \cdot V_p &= M_{3eq} \ddot{X}_3 \\
 k_{4eq} x_2 - k_{4eq} x_3 + \Gamma \cdot n \cdot V_p &= M_{3eq} \ddot{X}_3 \\
 M_{3eq} \ddot{X}_3 - k_{4eq} x_2 + k_{4eq} x_3 - \Gamma \cdot n \cdot V_p &= 0
 \end{aligned}$$

3.2.4.3. Pemodelan Kelistrikan Piezoelectric

Gambar 3.9 merupakan diagram sirkuit kelistrikan material piezoelectric, dimana material piezoelectric

menghasilkan energi listrik apabila terjadi defleksi. Energi listrik tersebut berupa voltase, arus listrik, dan daya bangkitan.



Gambar 3.9 Diagram Sirkuit Elektromagnetik *cantilever Piezoelectric*

Voltase bangkitan energi listrik pada mekanisme ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4c} x_p \quad (3.7)$$

Dimana :

V_p : Voltase bangkitan piezoelectric (volt)

d_{31} : Voltage constant (C/N)

E_p : Modulus elastisitas (N/m^2)

w_p : Lebar piezoelectric (m)

t : Tebal piezoelectric (m)

c : Piezoelectric capacitance (Farad)

x_p : Defleksi piezoelectric (m)

Sedangkan arus bangkitan dari piezoelectricnya dirumuskan sebagai berikut

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p)$$

Dimana

$$V_{mc} = \frac{Fi}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p}$$

Dimana :

F_i : Gaya lendutan dari eksitasi (N)

M : Massa (kg)

d_p : Konstanta damping ekuivalen piezoelectric (Ns/m)

k_p : Konstanta pegas ekuivalen piezoelectric (N/m)

C_p : Kapasitansi piezoelectric (Farad)

Sehingga daya bangkitan piezoelectric dapat dirumuskan menjadi :

$$P = V_p I_{mc}$$

Dimana :

P : Daya bangkitan piezoelectric (Watt)

I_{mc} : Arus bangkitan piezoelectric (Ampere)

3.2.5. Penurunan Persamaan Gerak

Persamaan gerak dari sistem diturunkan dengan membangun free body diagram dari model fisik sistem yang sudah disederhanakan. Diketahui dari free body diagram, didapatkan komponen gaya yang sejenis akan dijumlahkan dengan menggunakan hukum newton. Persamaan gerak untuk masing-masing kondisi didapatkan setelah itu, persamaan tersebut diubah dalam bentuk persamaan state variable dengan cara merubah bentuk persamaan tersebut kedalam persamaan differensial ordo satu.

3.2.6. Pembuatan Blok Simulasi Matlab

Persamaan state variable yang dihasilkan dari pemodelan dinamis kemudian diubah menjadi blok diagram simulasi dengan software matlab Simulink. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari pemodelan sistem utama dengan CPVA dan sistem utama tanpa CPVA.

3.2.7.Simulasi

Proses simulasi pada pemodelan sistem utama dimulai dengan input yang digunakan berupa sinusoidal, outputnya adalah displacement pada massa utama (X_1) yang akan menjadi input pada sistem absorber. Output pada sistem absorber yang dihasilkan adalah displacement (X_2) pada massa absorber yang akan menjadi input sistem piezoelectric. Sistem piezoelectric ini yang akan menghasilkan output berupa displacement (X_3), voltase listrik bangkitan dan arus.

Input yang digunakan untuk proses simulasi pada pemodelan sistem utama tanpa CPVA berupa gaya sinusoidal yang diberikan pada sistem utama, sehingga menghasilkan output berupa displacement pada massa utama (X_1). Kedua pemodelan tersebut akan menghasilkan reduksi respon sistem utama dan energy density dari CPVA.

Setelah blok diagram disusun, lalu parameter dimasukkan dan simulasi dijalankan. Simulasi bisa berjalan jika tidak terjadi kesalahan, dan dilanjutkan dengan memasukkan variasi kecepatan putaran motor dan jumlah piezoelectric yang digunakan, serta letak CPVA. Apabila simulasi tidak berjalan atau hasil tidak sesuai yang diinginkan, maka dilakukan pengecekan ulang dari langkah 3.2.4 yaitu pemodelan sistem dinamis.

3.2.8.Reduksi Respon Sistem Utama dan Energi Density

Nilai reduksi respon sistem utama dan energi density didapatkan setelah simulasi yang disertai variasi dijalankan. Kedua output tersebut diolah menjadi grafik respon terhadap variasi dan energi density terhadap variasi. Grafik yang dibuat yaitu grafik reduksi respon sistem utama dan energi density CPVA terhadap variasi kecepatan putar motor, jumlah *piezoelectric*, letak CPVA dan posisi sumber getaran yang tidak berada di *Center of Gravity* yang diberikan ke sistem utama.

3.2.9. Analisa Hasil

Grafik analisa reduksi respon sistem utama dan energi density oleh masing-masing variasi didapatkan dari simulasi yang sudah dilakukan. Grafik yang akan didapatkan adalah respon sistem terhadap variasi kecepatan putaran motor, variasi jumlah *cantilever piezoelectric*, variasi letak CPVA, *energy density* terhadap variasi kecepatan putar motor, variasi jumlah *cantilever piezoelectric*, variasi letak CPVA. Selain itu hasil dari penelitian ini nantinya akan dijadikan acuan untuk penelitian sejenis yang dilakukan dengan metode eksperimen.

3.2.10. Kesimpulan

Kesimpulan dan saran dibuat berdasarkan hasil analisa yang sudah dilakukan, hal ini bertujuan agar penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan lebih baik.

3.3. Parameter Penelitian

Parameter diperlukan dalam penelitian ini sebelum simulasi dijalankan, dan agar simulasi dapat dijalankan. Parameter yang diperlukan meliputi panjang, massa, koefisien pegas, serta koefisien redaman. Nilai panjang diperoleh dengan pengukuran menggunakan mistar, jangka sorong atau micrometer. Nilai massa didapatkan dari penimbangan benda dengan timbangan digital. Nilai dari koefisien pegas didapat dari pengujian tekan. Berikut adalah parameter yang digunakan pada penelitian ini

Tabel 3.1 Parameter Sistem Utama

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Sistem Utama	M_1	5	Kg
Koefisien Pegas 1 (ekuivalen)	K_1	3561.6	N/m
Koefisien Pegas 2	K_2	3561.6	N/m

(ekuivalen)			
Koefisien Pegas Exciter	K_0	152.2	N/m
Koefisien Redaman Batang Pengarah	C_1	3.8	N.s/m

Tabel 3.1 diatas merupakan nilai parameter dari sistem utama yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3.2 Parameter Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Absorber	M_{abs}	0.67; 0.82; 0.97	Kg
Koefisien Pegas Absorber	K_3	805; 1092.5; 1380	N/m
Koefisien Redaman Batang Pengarah Absorber	C_1	2	N.s/m

Tabel 3.2 diatas menunjukkan nilai parameter dari cantilever piezoelectric yang digunakan pada penelitian ini

Tabel 3.3 Parameter Material Piezoelectric

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Piezoelectric	M_{pzt}	3×10^{-4}	Kg
Ketebalan Piezoelectric	t	1×10^{-3}	m
Lebar Piezoelectric	w_{pzt}	6×10^{-3}	m
Panjang Piezoelectric	L_{pzt}	17.8×10^{-3}	m
Kapasitansi	C_{pzt}	244×10^{-12}	F
Konstanta regangan	d_{31}	110 x	C/N

Piezoelectric		10^{-12}	
Electromechanical coupling factor	k_{31}	12	%
Konstanta pegas piezoelectric	k_{pzt}	$5.75 \cdot 10^{-1}$	N/m
Modulus Young	E	3×10^{-9}	N/m^2

Tabel 3.3 diatas merupakan parameter dari material piezoelectric yang digunakan sebagai alat konversi energi pada penelitian ini. Berikut adalah penjelasan rinci bagaimana cara mendapatkan parameter tersebut.

3.3.1.Frekuensi Operasi

Pertama, menentukan motor DC yang akan digunakan sebagai sumber getaran. Pencarian dipasaran dilakukan berdasarkan kebutuhan torsi dan kecepatan putar yang digunakan dalam simulasi agar diketahui jenis motor apa yang dipakai. Setelah didapatkan dipasaran sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai frekuensi operasi dari sistem utama

3.3.2.Koefisien Pegas Alat Uji dan Massa Absorber (K_0, K_1, K_2, K_3)

Pegas yang digunakan dalam penelitian ini adalah pegas yang dijual dipasaran. Pegas tersebut memiliki kekakuan yang rendah hingga sedang. Setelah pegas didapatkan, dilakukan pengujian koefisien kekakuan pegas dengan memberikan massa dengan nilai tertentu pada pegas. Perubahan panjang pegas (Δx) diukur menggunakan jangka sorong. Diperoleh data dan nilai koefisien kekakuan K_0, K_1, K_2, K_3 yang dihitung menggunakan hukum Hooke, dimana

$$F = k \cdot \Delta x \quad (3.11)$$

3.3.3. Massa alat uji (M_1)

Massa alat uji yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari desain yang dibuat, desain tersebut meliputi dimensi alat, material yang digunakan. Penentuan material yang digunakan dengan cara mencari yang ada dipasaran, setelah itu dihitung dan didapatkan massa dari alat uji yang digunakan pada penelitian ini.

3.3.4. Massa absorber (M_2)

Massa absorber CPVA pada penelitian ini berasal dari massa *absorber* ditambah massa *cantilever piezoelectric*. Massa efektif absorber yang digunakan sebesar 5% dari massa utama yang berupa massa alat uji.[8] Sehingga didapatkan nilai dari massa *absorber* (M_2) sebagai berikut:

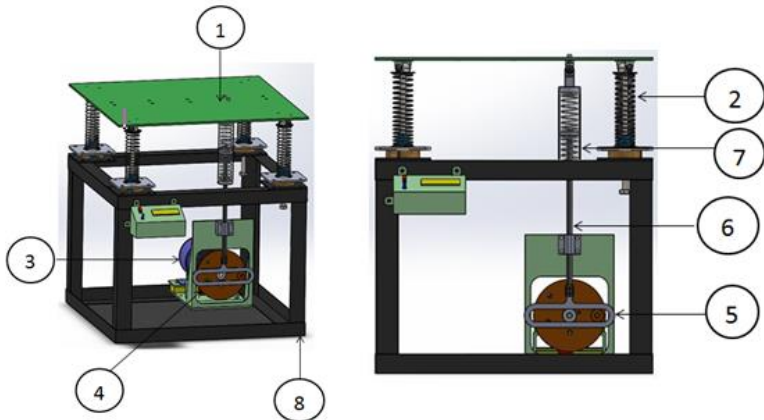
$$M_2 = M_{abs} + (n \cdot M_{pzt}) \quad (3.12)$$

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Perancangan

4.1.1. Perancangan Sistem Utama Tanpa CPVA

Sistem utama pada penelitian ini merupakan alat simulator getaran yang memiliki dimensi 50cm x 50cm x 80cm dan terdiri dari massa utama, pegas, motor DC, dan peredam. Berikut adalah perancangan simulator getaran yang sudah dibuat.



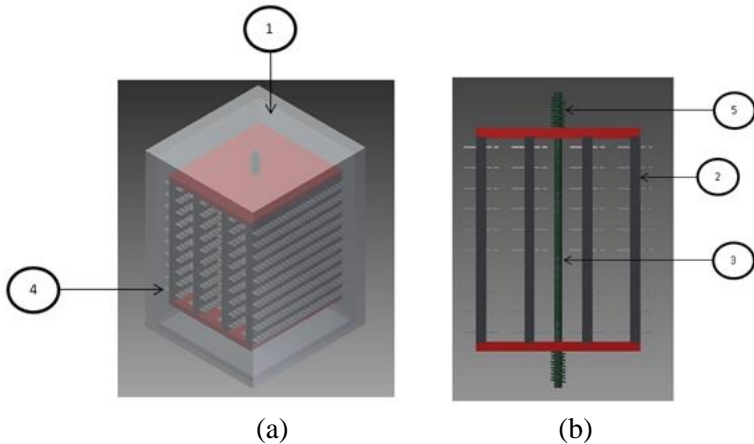
Gambar 4.1 Rancangan Mekanisme Sistem Utama Sebagai Simulator Getaran

Keterangan :

1. Plat
2. Pegas dan batang pengarah
3. Motor DC
4. Massa eksentrik
5. Slot massa eksentrik
6. Batang penggerak
7. Pegas penggerak
8. Kerangka alat pengujian

4.1.2. Perancangan Mekanisme Cantilever Piezoelectric

Selanjutnya perancangan *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) pada penelitian ini memiliki dimensi 22cm x 21cm x 30cm yang terdiri dari massa absorber, pegas absorber, peredam, dan *cantilever piezoelectric* yang mampu ditampung sebanyak 1760 buah. Mekanisme ini digunakan untuk mereduksi getaran dari sistem utama dan sebagai penghasil energi listrik, berikut adalah rancangannya.



Gambar 4.2 Rancangan *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) (a) Dengan Housing, (b) Dan Tanpa Housing.

Keterangan :

1. *Housing* CPVA
2. Massa absorber
3. Batang pengarah
4. *Cantilever Piezoelectric*
5. Pegas absorber

4.2. Analisa Respon

Pemodelan yang sudah dilakukan menggunakan Matlab Simulink dalam bentuk blok diagram. Input yang diberikan adalah variasi frekuensi operasi, jarak peletakan CPVA terhadap pusat massa (b), dan jumlah *Cantilever piezoelectric*. Sedangkan output yang dihasilkan dari simulasi ini adalah persentase reduksi displacement sistem utama (X_1), voltase, dan daya keluaran dari *piezoelectric*.

4.2.1. Analisa Respon Sistem Utama Tanpa CPVA

Sistem utama pada penelitian ini memiliki dua DOF dengan arah translasi dan rotasi yang disebabkan karena sumber getar yang tidak pada pusat massa. Sistem utama tersebut mendapatkan gaya eksitasi dari motor DC yang terhubung dengan massa eksentrik, sehingga tercipta getaran harmonik pada sistem utama. Pemodelan sistem utama tanpa *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA) digunakan sebagai pembanding dengan sistem yang diberi CPVA. Analisa sistem tanpa CPVA dan dengan CPVA ini dilakukan dengan analisa perhitungan dan simulasi dengan Matlab Simulink.

Gambar 3.4(a), 3.5 dan 3.7 pada bab sebelumnya merupakan gambar sistem utama tanpa CPVA, gambar sistem dinamis dan *free body diagram* dari sistem utama (M_1) sebelum ditambahkan CPVA. Displacement yang terjadi pada sistem utama terdiri dari arah translasi dan rotasi karena peletakan sumber getar tidak pada pusat massanya.

Berdasarkan persamaan 3.1 persamaan translasi sebagai berikut :

$$M_1 \ddot{X}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_o + k_2) x_1 + (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_o a) \theta_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2) \dot{\theta}_1 = k_o y$$

Berdasarkan persamaan 3.2 didapatkan persamaan rotasi sebagai berikut :

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + (c_1 l_1 - c_2 l_2) \dot{x}_1 + (k_1 l_1 - k_2 l_2 - k_0 a) x_1 + (k_1 l_1^2 - k_2 l_2^2 + k_0 a^2) \theta_1 + (c_1 l_1^2 - c_2 l_2^2) \dot{\theta}_1 = -k_0 y \cdot a$$

Persamaan diatas digunakan untuk mencari frekuensi natural dengan analisa fundamental dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (C_1 + C_2) & (C_1 l_1 - C_2 l_2) \\ (C_1 l_1 - C_2 l_2) & (C_1 l_1 l_1 - C_2 l_2 l_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_1 + K_2 + K_0) & (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) & (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 - K_0 a \cdot a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_0 y \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Asumsi yang digunakan dalam perhitungan frekuensi natural yaitu nilai redaman dan gaya eksternal diabaikan. Nilai \ddot{X} diubah dengan mensubstitusikan $\ddot{X} = -\lambda x$ dan $\lambda = \omega^2$, sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} (K_1 + K_2 + K_0) & (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) & (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 - K_0 a \cdot a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} -M_1 \omega^2 + (K_1 + K_2 + K_0) & (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 - K_0 a) & -J_1 \omega^2 + (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 - K_0 a \cdot a) \end{bmatrix} = \\ & \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Dimana :

M_1	: Massa Sistem Utama	(5 kg)
Y	: Amplitudo dari masa eksentrik	(0.01 m)
K_0	: Koefisien pegas dari massa eksentrik menuju massa 1	(152.2 N/m)
K_{1eq}	: Koefisien pegas 1 dan 3 di massa 1	(3561.6 N/m)
K_{2eq}	: Koefisien pegas 2 dan 4 di massa 1	(3561.6 N/m)
C_1	: Koefisien redaman 1 di massa 1	(2 Ns/m)
C_2	: Koefisien redaman 2 di massa 1	(2 Ns/m)
L_1	: Jarak dari titik pusat ke pegas 1	(0.4 m)
L_2	: Jarak dari titik pusat ke pegas 2 (m)	(0.4 m)
a	: Jarak pergeseran sumber getar (m)	(0.2 m)

Matriks diatas merupakan matriks yang digunakan untuk menghitung respon dari sistem utama tanpa CPVA. Berikut adalah perhitungan frekuensi naturalnya.

$$\begin{bmatrix} -5\omega^2 + (7275.4) & (-30.44) \\ (-30.44) & -0.104\omega^2 + (6.09) \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Karena $\lambda = \omega^2$, maka :

$$\det \begin{bmatrix} -5\lambda + (7275.4) & (-30.44) \\ (-30.44) & -0.104\omega^2 + (6.09) \end{bmatrix} = 0$$

Sehingga didapatkan nilai λ_1 dan λ_2 adalah :

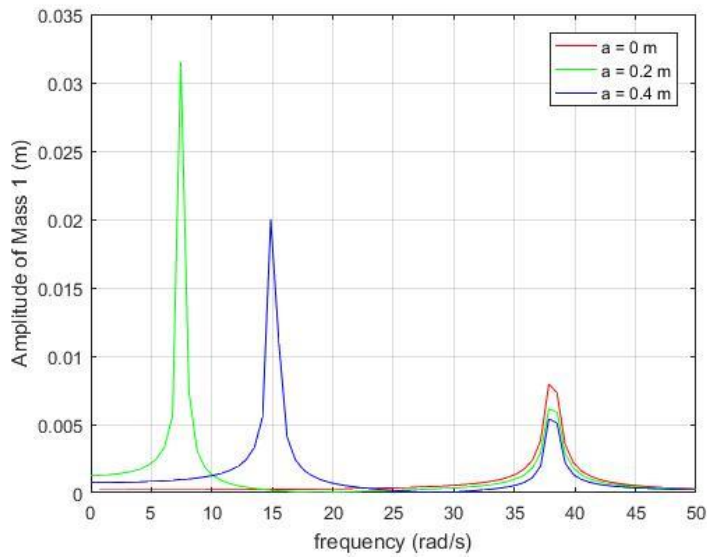
$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 57.15 & \text{jadi } \omega_{n1} = 7.56 \text{ rad/s} \\ \lambda_2 = 1456.18 & \text{jadi } \omega_{n2} = 38.16 \text{ rad/s} \end{array}$$

Dengan perhitungan yang sama seperti diatas didapatkan nilai frekuensi natural tanpa CPVA dengan variasi peletakkan sumber getar yang ditabelkan pada tabel 4.1 dibawah ini

Tabel 4.1 Frekuensi Natural Sistem Tanpa CPVA

Frek Natural Tanpa CPVA (Rad/s)			
	a = 0 m	a = 0.2 m	a = 0.4 m
ω_{n1}	38,14	7,56	15,1
ω_{n2}	-	38,16	38,2

Dari tabel 4.1 diatas didapatkan bode diagram seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 4.3 Bode Diagram Sistem Utama Tanpa CPVA dengan a = 0.2 m

Dari Gambar 4.3 dapat diketahui pengaruh pergeseran sumber getar terhadap frekuensi natural pertama dan kedua. Garis merah menunjukkan bode diagram sistem utama tanpa CPVA dengan peletakkan sumber getar pada pusat massa, terlihat hanya

memiliki satu frekuensi natural dengan nilai 38.14 Rad/s. Garis hijau menunjukkan bode diagram sistem utama tanpa CPVA dengan sumber getar yang diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, terlihat memiliki dua frekuensi natural, dimana frekuensi natural pertama sebesar 7.56 Rad/s dan frekuensi natural kedua sebesar 38.16 Rad/s. Garis biru merupakan bode diagram sistem utama tanpa CPVA dengan sumber getar diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa, dari gambar dapat diketahui ada dua frekuensi natural, dimana frekuensi pertama sebesar 15.1 Rad/s dan frekuensi natural kedua sebesar 38.2 Rad/s.

Selain itu terlihat bahwa sumber getar pada sistem utama tanpa CPVA yang diletakkan pada pusat massa hanya memiliki satu frekuensi natural, hal ini disebabkan karena sistem hanya dipengaruhi oleh koefisien pegas dan massa dari sistem utama tersebut dan arena gerakan yang terjadi hanya pada arah translasi. Sedangkan pada peletakkan sumber getar yang tidak di pusat massa menghasilkan dua frekuensi natural, hal ini disebabkan adanya pengaruh jarak peletakkan sumber getar terhadap pusat massa dan karena gerakan yang terjadi kearah translasi dan rotasi.

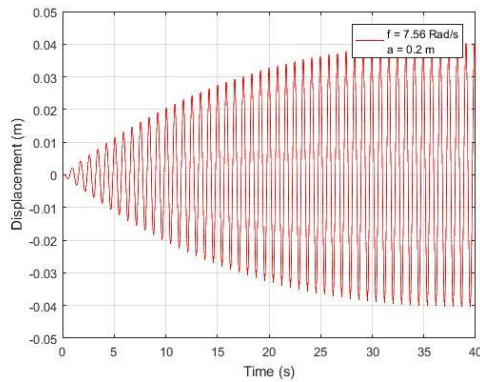
Dapat diketahui juga bahwa semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa maka, frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar. Sedangkan pada frekuensi natural kedua efek pergeseran dari posisi sumber getar tidak terlalu berpengaruh.

4.2.1.1. Analisa Respon Translasi Sistem Utama Tanpa CPVA

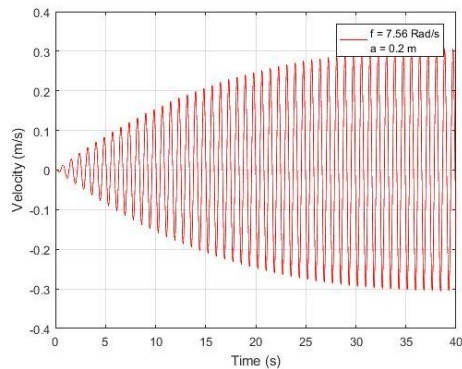
Variasi yang digunakan pada pemodelan sistem utama tanpa CPVA ini menggunakan dua macam variasi yaitu variasi frekuensi operasi, dan variasi peletakkan posisi sumber getar. Variasi frekuensi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 rad/s. Variasi

peletakkan posisi sumber getar pada penelitian ini ada tiga, yaitu saat sumber getar diletakkan pada pusat massa, digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan diletakkan pada 0.4 m dari pusat massa.

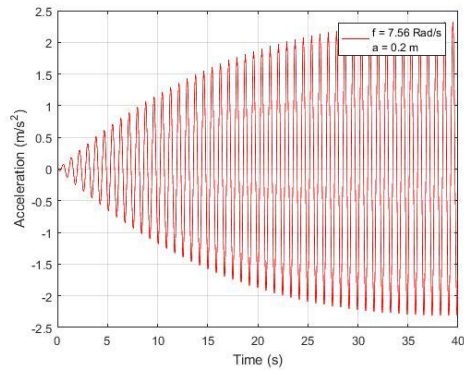
Berikut adalah contoh hasil yang didapatkan berupa respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan massa utama. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sebesar 7.56 Rad/s dan variasi posisi sumber getar sejauh 0.2 m dari pusat massa.



(a)



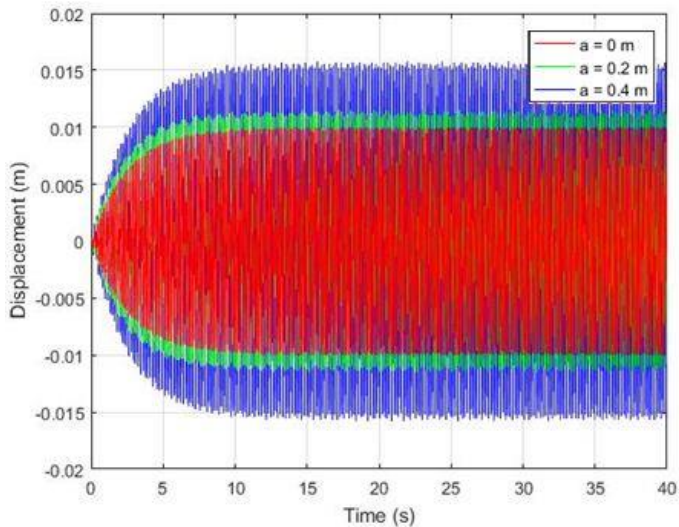
(b)



(c)

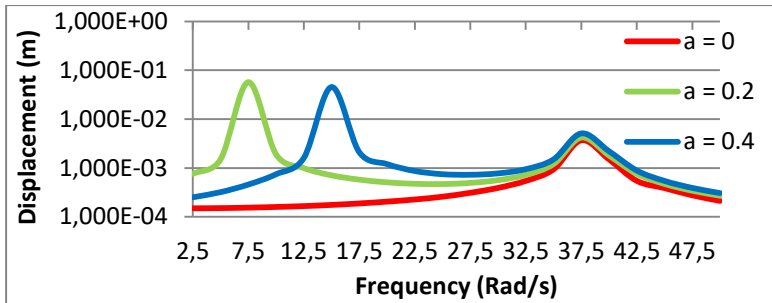
Gambar 4.4 Grafik Respon Perpindahan (a), Kecepatan (b), Dan Percepatan (c) Dari Massa Utama Tanpa CPVA

Gambar 4.4 diatas merupakan grafik respon yang dihasilkan oleh massa utama tanpa CPVA yang sudah disimulasikan pada frekuensi 7.56 Rad/s dan sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Gambar 4.4(a) merupakan respon perpindahan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Gambar 4.4(b) merupakan respon kecepatan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Gambar 4.4(c) merupakan respon percepatan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Berikut adalah respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA dengan variasi posisi dengan frekuensi yang dioperasikan pada frekuensi natural dua yaitu sebesar 38.16 Rad/s



Gambar 4.5 Grafik Respon Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Posisi Sumber Getar Pada Frekuensi 38.16 Rad/s

Gambar 4.5 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang dihasilkan oleh massa utama tanpa CPVA dengan variasi peletakkan posisi sumber getar yang dioperasikan pada frekuensi natural kedua. Garis merah merupakan respon perpindahan massa utama yang sumber getarnya diletakkan di pusat massa. Garis hijau merupakan respon perpindahan massa utama yang sumber getarnya digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dan garis biru merupakan respon perpindahan massa utama dimana sumber getarnya digeser sejauh 0.4 m dari pusat massa.



Gambar 4.6 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA

Gambar 4.6 menunjukkan grafik RMS perpindahan dengan variasi frekuensi berbanding posisi sumber getar. Garis merah menunjukkan sumber getar diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan sumber getar yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan sumber getar yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

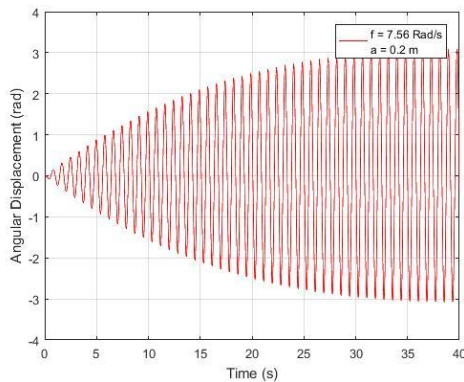
Dari gambar 4.6 diketahui bahwa pada saat sumber getar diletakkan pada sejauh 0.2 m dari pusat massa memiliki RMS perpindahan yang lebih tinggi dibanding dengan yang lainnya pada frekuensi operasi yang mendekati frekuensi natural pertamanya, hal ini disebabkan karena pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, semakin mendekati pusat massa, RMS perpindahannya akan semakin besar. Saat sumber getar diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa, RMS perpindahannya di frekuensi natural keduanya lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.

Sehingga semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa maka, frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar, namun semakin rendah RMS perpindahannya.

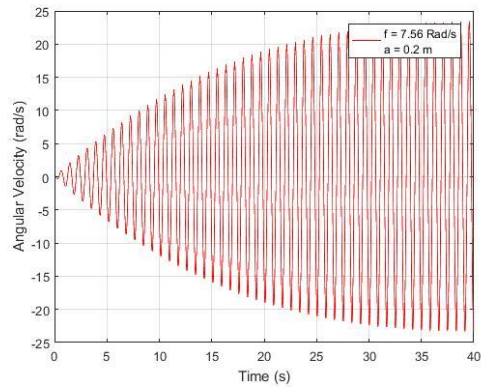
4.2.1.2. Analisa Respon Rotasi Sistem Utama Tanpa CPVA

Selanjutnya adalah analisa respon rotasi sistem utama tanpa CPVA, Variasi yang digunakan pada pemodelan ini menggunakan dua macam variasi yaitu variasi frekuensi operasi, dan variasi peletakkan posisi sumber getar. Variasi frekuensi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 rad/s. Variasi peletakkan posisi sumber getar pada penelitian ini yaitu saat sumber getar diletakkan pada pusat massa, digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan diletakkan pada 0.4 m dari pusat massa.

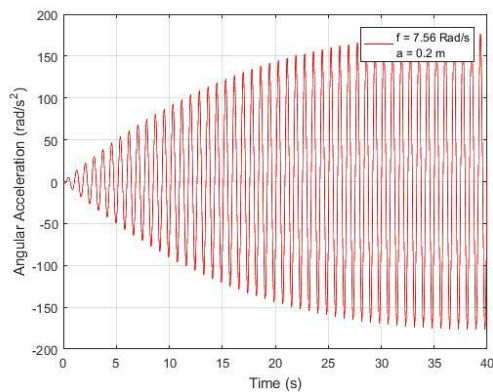
Berikut adalah contoh respon perpindahan sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut massa utama yang didapatkan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sebesar 7.56 Rad/s dan variasi posisi sumber getar sejauh 0.2 m dari pusat massa.



(a)



(b)

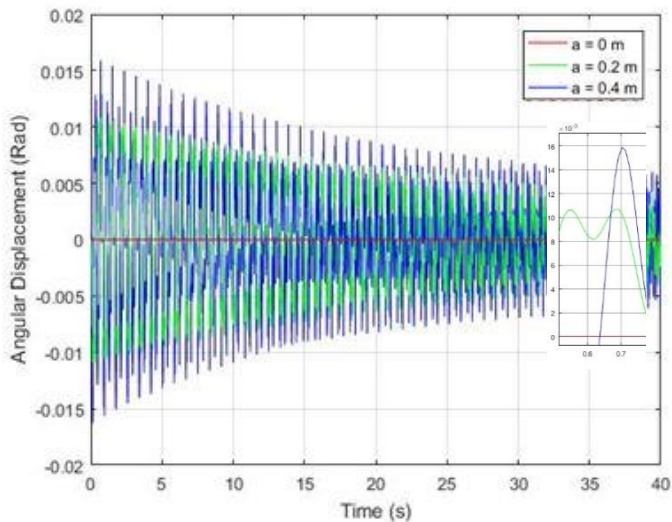


(c)

Gambar 4.7 Grafik Respon Perpindahan Sudut (a), Kecepatan Sudut (b), Dan Percepatan Sudut (c) Dari Massa Utama Tanpa CPVA

Gambar 4.7 diatas merupakan grafik respon sudut yang dihasilkan oleh massa utama tanpa CPVA yang sudah disimulasikan pada frekuensi 7.56 Rad/s dan sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Gambar 4.7(a)

merupakan respon perpindahan sudut dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Gambar 4.7(b) merupakan respon kecepatan sudut dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Gambar 4.7(c) merupakan respon percepatan sudut dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 40. Berikut adalah respon perpindahan sudut sistem utama tanpa CPVA dengan variasi posisi dengan frekuensi yang dioperasikan pada frekuensi natural dua yaitu sebesar 38.16 Rad/s.



Gambar 4.8 Grafik Respon Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA Dengan Variasi Posisi Sumber Getar Pada Frekuensi 38.16 Rad/S

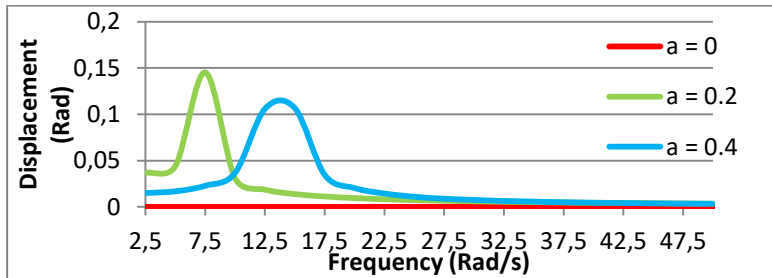
Gambar 4.8 diatas merupakan grafik respon perpindahan sudut yang dihasilkan oleh massa utama tanpa CPVA dengan variasi peletakkan posisi sumber getar yang dioperasikan pada frekuensi natural kedua. Garis merah merupakan respon perpindahan massa utama yang sumber getarnya diletakkan di

pusat massa. Garis hijau merupakan respon perpindahan massa utama yang sumber getarnya digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dan garis biru merupakan respon perpindahan massa utama dimana sumber getarnya digeser sejauh 0.4 m dari pusat massa. Penjelasan lebih lanjut pada grafik RMS dibawah.

Tabel 4.2 RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA

Sistem Utama Tanpa CPVA			
Frequency (rad/s)	RMS Displacement (Rad)		
	a = 0 m	a = 0.2 m	a = 0.4 m
2,5	0	0,0367	0,0149
5	0	0,0441	0,0168
7,5	0	0,1452	0,0228
10	0	0,0308	0,0368
12,5	0	0,0186	0,1059
15	0	0,0138	0,1066
17,5	0	0,0112	0,0345
20	0	0,0095	0,0203
22,5	0	0,0082	0,0144
25	0	0,0073	0,0109
27,5	0	0,0066	0,0088
30	0	0,006	0,0075
32,5	0	0,0055	0,0064
35	0	0,0051	0,0057
37,5	0	0,0047	0,005
40	0	0,0044	0,0045
42,5	0	0,0042	0,0041
45	0	0,0039	0,0038
47,5	0	0,0037	0,0035
50	0	0,0035	0,0033

Tabel 4.2 diatas menunjukkan respon perpindahan sudut dari massa utama tanpa CPVA yang dipengaruhi oleh jarak peletakkan sumber getar saat diletakkan di pusat masa, digeser sejauh 0.2 m, dan diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.



Gambar 4.9 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Tanpa CPVA dengan Variasi Frekuensi dan Posisi CPVA

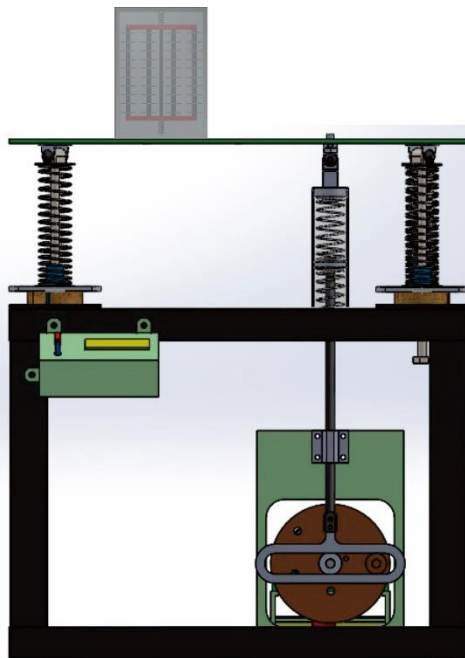
Gambar 4.9 menunjukkan diagram RMS perpindahan sudut dengan variasi frekuensi berbanding posisi sumber getar. Garis merah menunjukkan sumber getar diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan sumber getar yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan sumber getar yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

Dari gambar 4.9 diketahui bahwa pada saat sumber getar diletakkan pada sejauh 0.2 m dari pusat massa memiliki RMS perpindahan sudut yang lebih tinggi dibanding dengan yang lainnya pada frekuensi operasi yang mendekati frekuensi natural pertamanya, hal ini disebabkan karena pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, semakin mendekati pusat massa, RMS perpindahannya akan semakin besar. Pada saat sumber getar diletakkan pada pusat massa tidak terjadi perpindahan sudut, hal ini disebabkan tidak adanya pengaruh dari jarak antara sumber getar dengan pusat massa.

Sehingga semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, maka RMS perpindahan sudut yang ada di daerah frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar.

4.2.2. Analisa Respon Sistem Utama Dengan CPVA dan Jumlah *Piezoelectric* Tetap

Gambar 4.10 dibawah ini merupakan gambar rancangan sistem utama yang sudah ditambahkan dengan CPVA yang akan dianalisa pada subbab ini. Gambar 3.6 dan 3.8 pada bab sebelumnya merupakan pemodelan sistem dinamis dari sistem utama dengan CPVA dan *free body diagram* dari sistem utama dengan CPVA.



Gambar 4.10 Rancangan Mekasnisme Sistem utama Dengan CPVA

Berdasarkan Persamaan 3.8 didapatkan persamaan gerak translasi sistem utama sebagai berikut

$$M_1\ddot{X}_1 + (c_1 + c_2 + c_3)\dot{x}_1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_o)x_1 + (k_1l_1 - k_2l_2 + k_3b - k_oa)\theta_1 + (c_1l_1 - c_2l_2 + c_3b)\dot{\theta}_1 - k_3x_2 - c_3\dot{x}_2 = k_0y$$

Berdasarkan persamaan 3.9 didapatkan persamaan gerak rotasi sistem utama sebagai berikut

$$J_1\ddot{\theta}_1 + (c_1l_1 - c_2l_2 + c_3b)\dot{x}_1 + (k_1l_1 - k_2l_2 - k_oa + k_3b)x_1 + (k_1l_1^2 - k_2l_2^2 + k_oa^2 + k_3b^2)\theta_1 + (c_1l_1^2 - c_2l_2^2 + c_3b^2)\dot{\theta}_1 - K_3b \cdot x_2 - c_3b \cdot \dot{x}_2 = -k_0y \cdot a$$

Berdasarkan persamaan 3.10 didapatkan persamaan gerak massa absorber sebagai berikut

$$M_2\ddot{X}_2 - c_3\dot{x}_1 + c_3\dot{x}_2 - k_3x_1 + (k_3 + k_{4eq})x_2 - k_{4eq}x_3 - k_3\theta_1b - c_3\dot{\theta}_1b + \Gamma \cdot n \cdot V_p = 0$$

Berdasarkan persamaan 3.10 didapatkan persamaan gerak massa piezoelectric sebagai berikut

$$M_{3eq}\ddot{X}_3 - k_{4eq}x_2 + k_{4eq}x_3 - \Gamma \cdot n \cdot V_p = 0$$

Persamaan diatas digunakan untuk mencari frekuensi natural sistem utama dengan CPVA yang dapat dicari dengan analisa fundamental dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (C_1 + C_2 + C_3) & (C_1 l_1 - C l_2 + C_3 b) & -C_3 & 0 \\ (C_1 l_1 - C l_2 + C_3 b) & (C_1 l_1 l_1 - C_2 l_2 l_2 + C_3 b b) & -C_3 b & 0 \\ -C_3 & -C_3 b & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{Bmatrix} + \\
\begin{bmatrix} (K_1 + K_2 + K_3 + K_0) & (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & -K_3 & 0 \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 + K_3 l_3 l_3 + K_0 a \cdot a) & -K_3 b & 0 \\ -K_3 & -K_3 b & (K_3 + K_4) & -K_4 \\ 0 & 0 & -K_4 & K_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \\
\begin{Bmatrix} K_0 y \\ -K_0 y a \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Asumsi yang digunakan dalam perhitungan frekuensi natural yaitu nilai redaman dan gaya eksternal diabaikan. Nilai \ddot{X} diubah dengan mensubstitusikan $\ddot{X} = -\lambda x$ dan $\lambda = \omega^2$, sehingga persamaan diatas menjadi :

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_1 + K_2 + K_3 + K_0) & (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & -K_3 & 0 \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 + K_3 l_3 l_3 + K_0 a \cdot a) & -K_3 b & 0 \\ -K_3 & -K_3 b & (K_3 + K_4) & -K_4 \\ 0 & 0 & -K_4 & K_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \\
\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\
\begin{bmatrix} (K_1 + K_2 + K_3 + K_0) - \omega^2 & (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & -K_3 & 0 \\ (K_1 l_1 - K_2 l_2 + K_3 l_3 - K_0 a) & (K_1 l_1 l_1 - K_2 l_2 l_2 + K_3 l_3 l_3 + K_0 a \cdot a) - \omega^2 & -K_3 b & 0 \\ -K_3 & -K_3 b & (K_3 + K_4) - \omega^2 & -K_4 \\ 0 & 0 & -K_4 & K_4 - \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dimana :

- a : Jarak pergeseran sumber getar terhadap pusat massa (m)
(0.2 m)
- b : Jarak pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa (m)
(0 m)
- M_1 : Massa Sistem Utama (5kg)
- M_2 : Massa Absorber (0.67 kg)
- M_3 : Massa *Piezoelectric* (0.42 kg)
- Y : Amplitudo dari masa eksentrik (0.01 m)

K_0	: Koefisien pegas dari massa eksentrik menuju massa 1	(152.2 N/m)
K_{1eq}	: Koefisien pegas 1 dan 3 di massa 1	(3561.6 N/m)
K_{2eq}	: Koefisien pegas 2 dan 4 di massa 1	(3561.6 N/m)
K_3	: Koefisien pegas 3 di massa 2	(400 N/m)
K_{4eq}	: Koefisien pegas 4 di massa 3	(805 N/m)
C_1	: Koefisien redaman 1 di massa 1	(2 Ns/m)
C_2	: Koefisien redaman 2 di massa 1	(2 Ns/m)
C_3	: Koefisien redaman 3 di massa 2	(2 Ns/m)
L_1	: Jarak dari titik pusat ke pegas 1 (m)	(0.4 m)
L_2	: Jarak dari titik pusat ke pegas 2 (m)	(0.4 m)

Matriks diatas merupakan matriks yang digunakan untuk menghitung respon dari sistem utama tanpa CPVA. Berikut adalah perhitungan frekuensi naturalnya.:

Dengan :

$$\begin{aligned}
 n &= 1400 & M_2 &= 0.25 + 0.42 \\
 M_3 &= 0.0003 \text{ kg} \times 1400 & &= 0.67 \text{ Kg} \\
 &= 0.42 \text{ kg} & b &= 0 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\det \begin{bmatrix} 7675.4 - 5\omega^2 & -30.44 & -400 & 0 \\ -30.44 & 6.09 - 0.104\omega^2 & 0 & 0 \\ -400 & 0 & 1205 - 0.67\omega^2 & -805 \\ 0 & 0 & -805 & 805 - 0.42\omega^2 \end{bmatrix} = 0$$

Sehingga didapatkan :

$$\begin{aligned}
 \omega_{n1} &= 7.56 \text{ Rad/s} & \omega_{n3} &= 39.29 \text{ Rad/s} \\
 \omega_{n2} &= 17.84 \text{ Rad/s} & \omega_{n4} &= 58.21 \text{ Rad/s}
 \end{aligned}$$

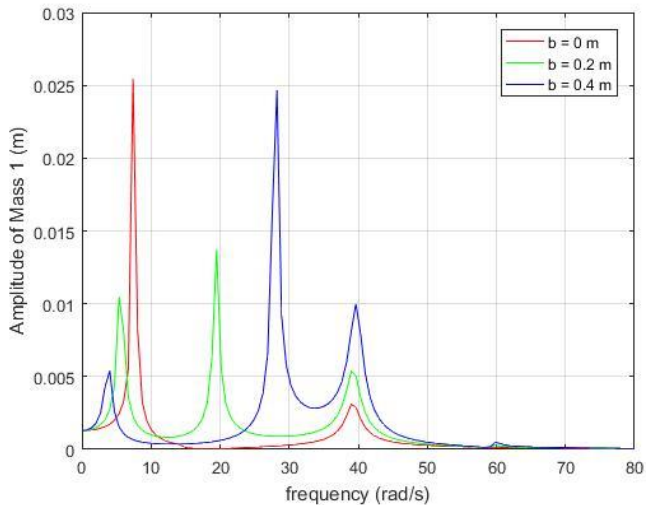
Dengan cara perhitungan yang sama seperti diatas, didapatkan frekuensi natural sistem utama dengan CPVA. Berikut

merupakan tabel dari frekuensi natural sistem dengan CPVA yang sudah dihitung dengan cara seperti diatas.

Tabel 4.3 Frekuensi Natural Sistem Utama dengan CPVA pada $a = 0.2 \text{ m}$

Frekuensi Natural Sistem dengan CPVA					
Jumlah Pzt			1400	1900	2400
$M_3 = (n \times 0.0003)\text{kg}$			0,42	0,57	0,72
$M_2 = (0.25 + M_3)\text{kg}$			0,67	0,82	0,97
Frek Natural dengan CPVA (Rad/s)	b = 0 m	ω_{n1}	7,56	7,56	7,56
		ω_{n2}	17,84	15,93	14,53
		ω_{n3}	39,29	39,27	39,25
		ω_{n4}	58,21	58,96	59,46
	b = 0.2 m	ω_{n1}	6,18	5,90	5,46
		ω_{n2}	21,75	20,37	19,43
		ω_{n3}	39,34	39,31	39,29
		ω_{n4}	58,33	59,06	59,54
	b = 0.4 m	ω_{n1}	4,50	4,14	3,85
		ω_{n2}	29,27	28,50	27,97
		ω_{n3}	39,85	39,79	39,76
		ω_{n4}	58,81	59,43	59,84

Berikut ini adalah bode diagram dari sistem utama dengan CPVA



Gambar 4.11 Bode Diagram Sistem Utama Dengan CPVA

Dari Gambar 4.11 dapat diketahui pengaruh pergeseran letak CPVA terhadap frekuensi natural yang dihasilkan. Jumlah piezoelectric yang digunakan sebanyak 2400 buah, dan sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan bode diagram sistem utama dengan CPVA dimana CPVA diletakkan pada pusat massa, dimana menghasilkan tiga frekuensi natural, frekuensi natural pertama dengan nilai 7.56 Rad/s, frekuensi natural kedua sebesar 14.53 Rad/s, frekuensi ketiga sebesar 39.25 Rad/s. Garis hijau menunjukkan bode diagram sistem dengan CPVA dimana CPVA diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, terlihat memiliki empat frekuensi natural, dimana frekuensi natural pertama sebesar 5,46 Rad/s, frekuensi natural kedua sebesar 19,43 Rad/s, frekuensi natural ketiga sebesar 39,29, dan frekuensi natural keempat sebesar 59,54 Rad/s. Garis biru merupakan bode diagram sistem utama dengan CPVA dimana CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa, dari

gambar dapat diketahui ada empat frekuensi natural, dimana frekuensi pertama sebesar 3.85 Rad/s, frekuensi natural kedua sebesar 27.97 Rad/s, frekuensi natural ketiga sebesar 39.76 Rad/s, dan frekuensi natural kedua sebesar 59.84 Rad/s.

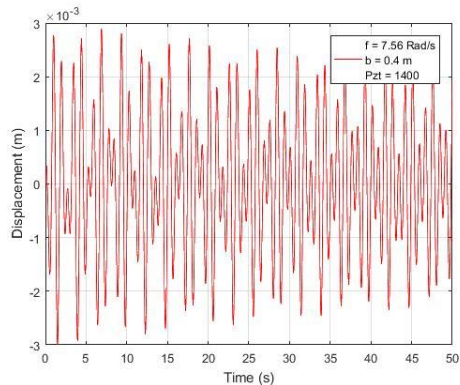
Telihat bahwa CPVA pada sistem utama dengan CPVA yang diletakkan pada pusat massa hanya memiliki dua puncak, hal ini disebabkan karena tidak adanya pengaruh jarak peletakkan CPVA terhadap sistem utama tersebut. Sedangkan pada peletakkan sumber getar yang tidak di pusat massa terlihat memiliki 3 puncak, hal ini disebabkan adanya pengaruh jarak peletakkan sumber getar terhadap pusat massa.

Diketahui bahwa karena pengaruh peletakkan CPVA dan posisi sumber getar menghasilkan empat puncak karena pada sistem ada empat derajat kebebasan. Lalu semakin jauh pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa, maka frekuensi natural pertama yang terbentuk akan kecil. Sedangkan pada frekuensi natural kedua, semakin jauh peletakkan CPVA terhadap pusat massa akan menghasilkan frekuensi natural kedua yang lebih besar. Selanjutnya pada frekuensi natural ketiga dan keempat pergeserannya tidak terlalu dipengaruhi oleh posisi sumber getar dan posisi CPVA terhadap pusat massa.

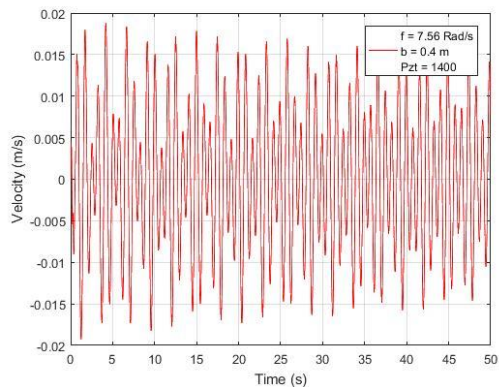
4.2.2.1. Analisa Respon Translasi Sistem Utama Dengan CPVA dan Jumlah Piezoelectric tetap

Simulasi pemodelan yang dilakukan menggunakan dua variasi, yaitu variasi frekuensi operasi, variasi peletakkan CPVA terhadap pusat massa, dengan jumlah piezoelectric tetap. Variasi frekuensi yang digunakan pada sistem utama dengan CPVA ini adalah diantara 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 Rad/s. Variasi posisi CPVA pada penelitian ini ada tiga, yaitu saat CPVA diletakkan pada pusat massa, saat digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

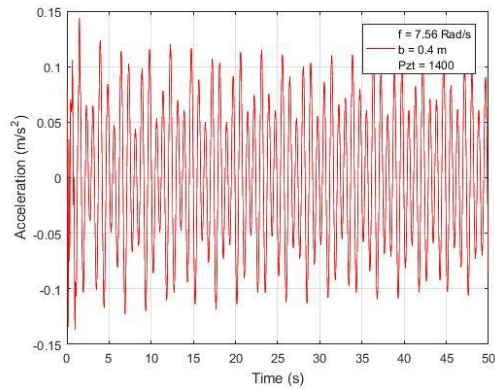
Gambar 4.12 dibawah ini merupakan hasil simulasi respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan massa utama. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah.



(a)



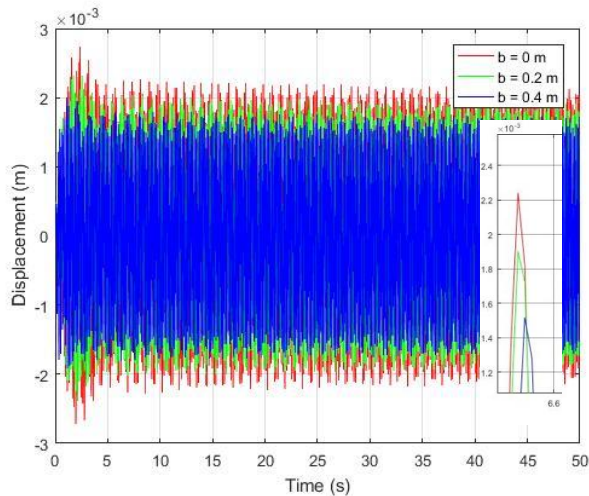
(b)



(c)

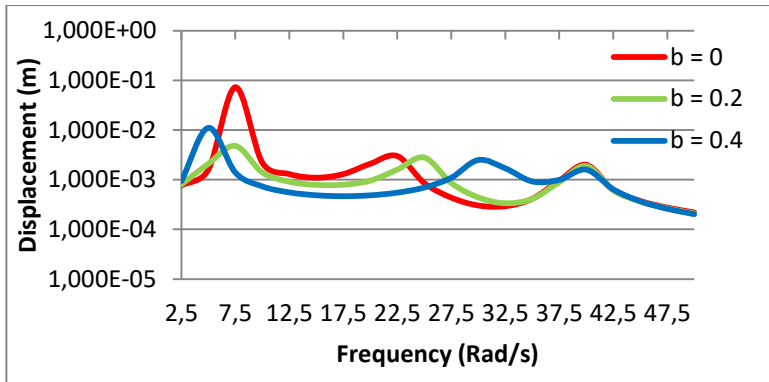
Gambar 4.12 Grafik Respon Perpindahan (a), Kecepatan (b), Dan Percepatan (c) Dari Massa Utama Dengan CPVA

Gambar 4.12 diatas adalah grafik respon yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA, simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi operasi satu, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah. Gambar 4.12 (a) merupakan respon perpindahan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30. Gambar 4.12 (b) merupakan respon kecepatan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30. Dan gambar 4.12 (c) merupakan respon percepatan dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30.



Gambar 4.13 Grafik Respon Perpindahan Dari Massa Utama Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.

Gambar 4.13 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA yang disimulasikan dengan frekuensi operasi sebesar 38.16 Rad/s, dengan piezoelectric yang berjumlah 1400, dan peletakkan CPVA terhadap pusat massa yang bervariasi. Garis merah merupakan respon perpindahan massa utama dimana CPVA diletakkan pada pusat massa. Garis hijau merupakan respon perpindahan massa utama dimana CPVA digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dan garis biru merupakan perpindahan massa utama dimana CPVA digeser sejauh 0.4 m dari pusat massa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa semakin jauh pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa, maka responnya akan semakin menurun.



Gambar 4.14 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Dengan CPVA, Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA

Gambar 4.14 menunjukkan grafik RMS perpindahan sistem utama dengan CPVA dengan variasi frekuensi berbanding posisi CPVA, sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric yang digunakan sebanyak 1400 buah. Garis merah menunjukkan CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

Dari gambar 4.14 diketahui bahwa pada saat CPVA diletakkan pada pusat massa memiliki RMS perpindahan yang lebih tinggi dibanding dengan yang lainnya pada frekuensi operasi yang mendekati frekuensi natural pertama dan kedua, hal ini disebabkan karena pergeseran posisi CPVA terhadap pusat massa, semakin mendekati pusat massa, RMS perpindahannya akan semakin besar.

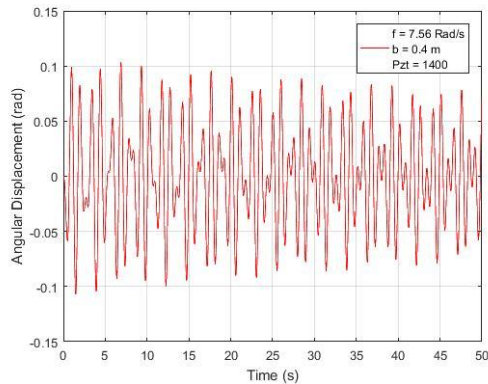
Sehingga semakin jauh pergeseran posisi CPVA terhadap pusat massa maka, frekuensi natural pertama dan kedua yang terbentuk akan semakin kecil. Begitu juga dengan RMS

perpindahannya, semakin jauh posisi CPVA terhadap pusat massa maka semakin rendah RMS perpindahannya.

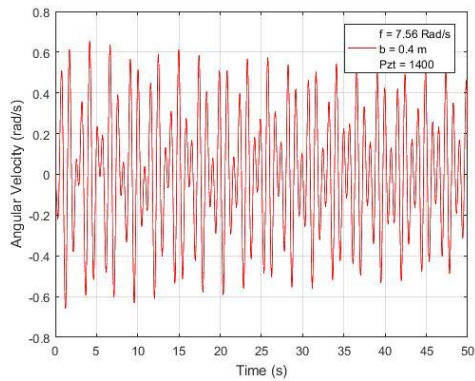
4.2.2.2. Analisa dan Pembahasan Respon Rotasi Sistem Utama Dengan CPVA dan Jumlah Piezoelectric tetap

Selanjutnya adalah analisa respon rotasi sistem utama dengan CPVA Variasi frekuensi yang digunakan pada sistem utama dengan CPVA ini adalah diantara 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 Rad/s. Variasi posisi CPVA pada penelitian ini ada tiga, yaitu saat CPVA diletakkan pada pusat massa, saat digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Sedangkan jumlah piezoelectric yang digunakan sebanyak 1400 buah

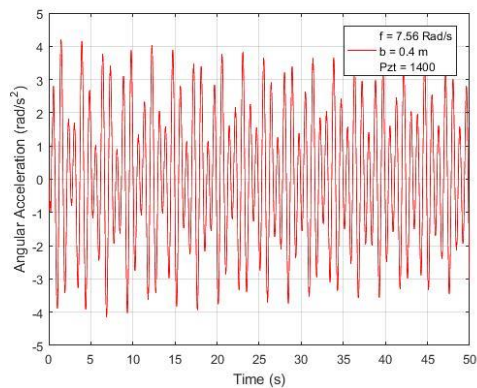
Berikut adalah contoh respon perpindahan sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut massa utama yang didapatkan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA sebesar 7.56 Rad/s dan variasi posisi sumber getar sejauh 0.4 m dari pusat massa.



(a)



(b)

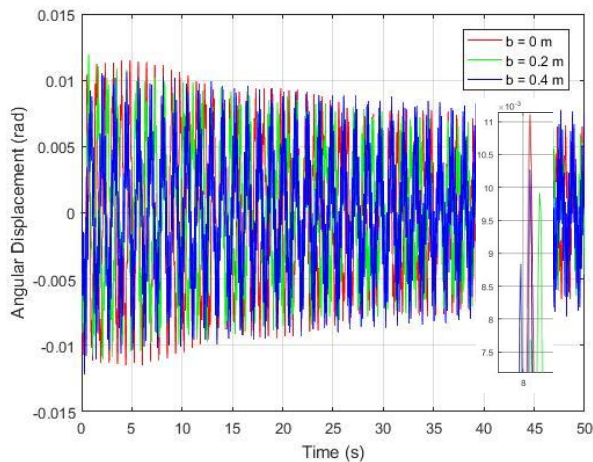


(c)

Gambar 4.15 Grafik respon perpindahan sudut (a), Kecepatan sudut (b), dan percepatan sudut (c) dari massa utama dengan CPVA.

Gambar 4.15 diatas adalah grafik respon perpindahan sudut yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA, simulasi dilakukan dengan menggunakan frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah. Gambar 4.15 (a) merupakan respon perpindahan sudut dari

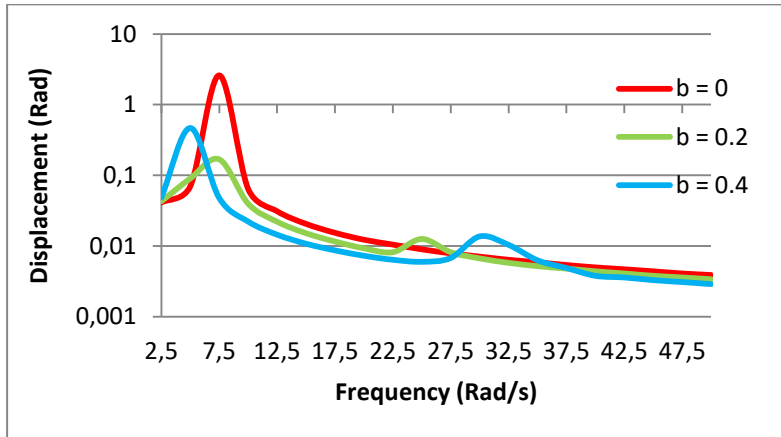
massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30. Gambar 4.15 (b) merupakan respon kecepatan sudut dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30. Gambar 4.15 (c) merupakan respon percepatan sudut dari massa utama yang mencapai kondisi steady state pada detik ke 30.



Gambar 4.16 Grafik Respon Perpindahan Sudut Dari Massa Utama Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.

Gambar 4.16 diatas merupakan grafik respon perpindahan sudut yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA yang disimulasikan pada CPVA yang dioperasikan pada frekuensi 38.16 Rad/s, piezoelectric yang berjumlah 1400, dan peletakkan CPVA terhadap pusat massa yang bervariasi. Garis merah merupakan respon perpindahan sudut massa utama dimana CPVA diletakkan pada pusat massa. Garis hijau merupakan respon perpindahan sudut massa utama dimana CPVA digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis biru merupakan perpindahan sudut massa utama dimana CPVA digeser sejauh 0.4 m dari pusat massa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa semakin jauh

pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa, maka responnya akan semakin besar.



Gambar 4.17 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Dengan CPVA, Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA

Gambar 4.17 menunjukkan grafik RMS perpindahan sudut dengan variasi frekuensi berbanding posisi CPVA, dengan sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric yang digunakan sebanyak 1400 buah. Garis merah menunjukkan CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

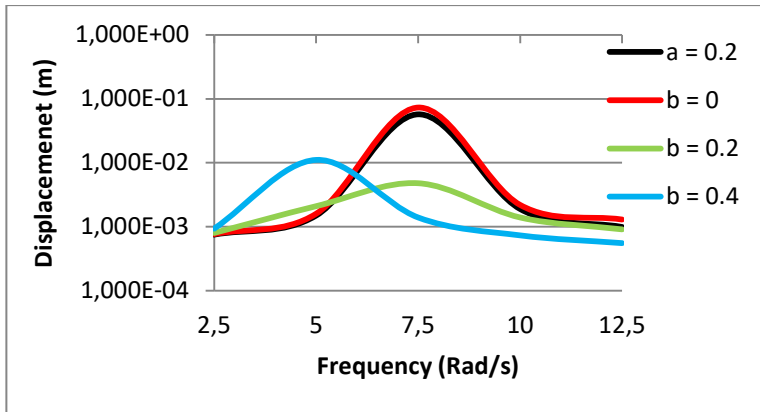
Selanjutnya dari gambar 4.17 diketahui bahwa pada saat CPVA diletakkan pada pusat massa memiliki RMS perpindahan sudut yang lebih tinggi dibanding dengan yang lainnya pada frekuensi operasi yang mendekati frekuensi natural pertamanya, hal ini disebabkan karena pergeseran posisi CPVA terhadap pusat

massa, semakin mendekati pusat massa, RMS perpindahan sudutnya akan semakin besar.

Sehingga didapatkan bahwa semakin dekat pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, maka RMS perpindahan sudut yang ada di daerah frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar.

4.2.2.3. Analisa Reduksi Translasi Sistem Utama dengan CPVA

Setelah didapatkan RMS Respon getaran pada sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA, selanjutnya dilakukan analisa reduksi respon perpindahan sistem utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA. Analisa yang dilakukan yaitu dengan cara membandingkan respon perpindahan translasi sistem utama tanpa CPVA dengan sistem utama yang sudah diberi CPVA. Berikut adalah grafik perbandingan RMS perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA. Karena CPVA digunakan untuk mereduksi pada frekuensi natural pertama, maka yang dianalisa hanya di daerah frekuensi natural pertama system utama tanpa CPVA.



Gambar 4.18 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA

Gambar 4.18 menunjukkan grafik RMS perpindahan sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA. Garis hitam merupakan RMS perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa pada sistem utama dengan CPVA.

Selanjutnya dari gambar 4.18 itu dihitung persentase reduksi respon perpindahannya. Cara menghitung persentase reduksi pada frekuensi operasi 7.5 Rad/s dengan CPVA diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa yaitu dengan perhitungan sebagai berikut.

$$R = \frac{R_t - R_c}{R_t} \times 100\%$$

Dimana :

R : Persentase reduksi respon sistem utama degan CPVA

R_t : Respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA
(0,0572 m)

R_c : Respon perpindahan sistem utama dengan CPVA
(0,0048 m)

Dengan perumusan diatas didapatkan

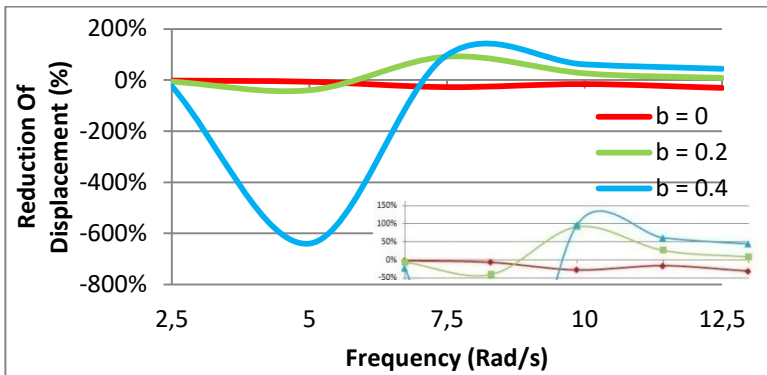
$$R = \frac{0,0572 - 0,0048}{0,0572} \times 100\% = 92\%$$

Dengan cara yang sama seperti diatas, didapatkan persentase reduksi respon perpindahan sistem utama dengan CPVA yang dibuat dalam tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Persentase Reduksi Respon Sistem Utama dengan CPVA

Reduksi Respon Sistem Utama Dengan CPVA			
Frequency (Rad/s)	Reduksi RMS Displacement (%)		
	b = 0	b = 0.2	b = 0.4
2,5	-2%	-6%	-24%
5	-7%	-40%	-640%
7,5	-28%	92%	98%
10	-16%	26%	61%
12,5	-31%	8%	44%

Tabel 4.4 diatas menunjukkan persentase reduksi respon perpindahan dari massa utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya berada sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dari tabel 4.7 diatas lalu dibuat grafik seperti gambar 4.19 dibawah ini



Gambar 4.19 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.

Gambar 4.19 menunjukkan grafik Persentase Reduksi perpindahan sistem utama dengan CPVA. Garis merah menunjukkan persentase reduksi saat CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan persentase reduksi saat CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan persentase reduksi saat CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

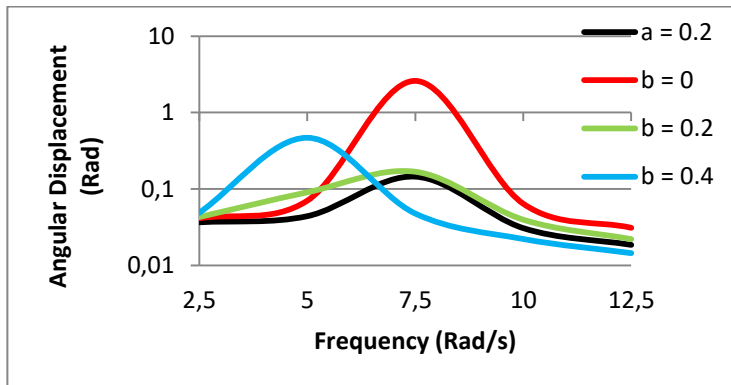
Terlihat dari gambar 4.19 bahwa persentase reduksi respon yang mendekati frekuensi natural pertama pada CPVA yang diletakkan pada sejauh 0.4 m dari pusat massa menghasilkan persentasi yang paling besar dengan perbedaan yang cukup jauh. Sehingga didapatkan bahwa semakin jauh peletakkan CPVA, maka persentase reduksi respon yang dihasilkan pada daerah yang mendekati frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena frekuensi natural baru yang terbentuk semakin jauh bergeser dari frekuensi natural saat belum ditambahkan dengan CPVA.

Dari tabel 4.7 dapat dilihat pada frekuensi-frekuensi tertentu menghasilkan persentase reduksi yang memiliki nilai

negative, hal ini disebabkan karena respon yang dihasilkan sistem utama dengan CPVA lebih tinggi dibandingkan terhadap sistem utama tanpa CPVA pada frekuensi tersebut karna pengaruh dari massa, koefisien pegas sistem utama yang sudah berubah karena sudah ditambahkan CPVA.

4.2.2.4. Analisa Reduksi Rotasi Sistem Utama dengan CPVA

Analisa yang dilakukan untuk mendapatkan reduksi rotasi sistem utama dengan CPVA yaitu dengan cara membandingkan respon perpindahan sudut sistem utama tanpa CPVA dengan sistem utama yang sudah diberi CPVA. Berikut adalah grafik perbandingan RMS perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA. Karena CPVA digunakan untuk mereduksi pada frekuensi natural pertama, maka yang dianalisa hanya di daerah frekuensi natural pertama system utama tanpa CPVA.



Gambar 4.20 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA

Gambar 4.20 menunjukkan grafik RMS perpindahan sudut sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA.

Garis hitam merupakan RMS perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan perpindahan sudut saat CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan perpindahan sudut saat CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan perpindahan sudut saat CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa pada sistem utama dengan CPVA.

Seperti translasi selanjutnya dihitung persentase reduksi respon perpindahan sudutnya. Cara menghitung persentase reduksi pada frekuensi operasi 10 Rad/s dengan CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa yaitu dengan perhitungan sebagai berikut.

$$R_s = \frac{Rt_s - Rc_s}{Rt_s} \times 100\%$$

Dimana :

R_s : Persentase reduksi respon sistem utama dengan CPVA

Rt_s : Respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA
(0,0308 rad)

Rc_s : Respon perpindahan sistem utama dengan CPVA
(0,0222 rad)

Dengan perumusan diatas didapatkan

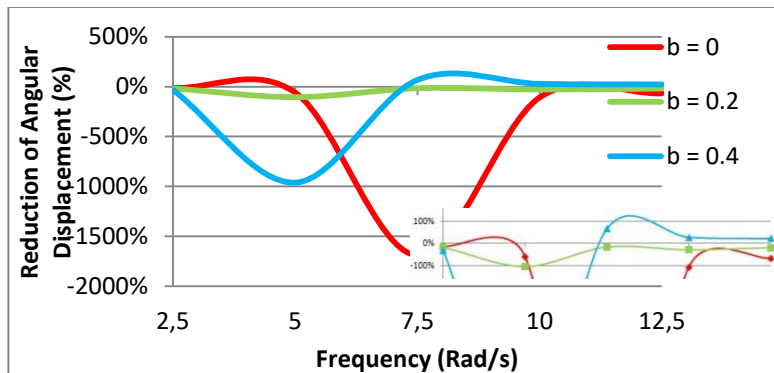
$$R = \frac{0,0308 - 0,0222}{0,0308} \times 100\% = 28\%$$

Dengan cara yang sama seperti diatas, didapatkan persentase reduksi respon perpindahan sudut sistem utama dengan CPVA yang dibuat dalam tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Persentase Reduksi Respon Angular Sistem Utama dengan CPVA

Reduksi Respon Sistem Utama Dengan CPVA			
Frequency (rad/s)	Reduksi RMS Displacement (%)		
	b = 0	b = 0.2	b = 0.4
2,5	-13%	-17%	-33%
5	-59%	-105%	-961%
7,5	-1688%	-16%	67%
10	-108%	-29%	28%
12,5	-67%	-19%	22%

Tabel 4.5 diatas menunjukkan persentase reduksi respon perpindahan sudut dari massa utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya berada sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dari tabel 4.8 diatas lalu dibuat grafik seperti gambar 4.21 dibawah ini



Gambar 4.21 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.

Gambar 4.21 menunjukkan grafik persentase reduksi perpindahan sudut sistem utama dengan CPVA. Garis merah menunjukkan persentase reduksi saat CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan persentase reduksi saat CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan persentase reduksi saat CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

Dari gambar 4.21 bahwa persentase reduksi respon yang mendekati frekuensi natural pertama pada CPVA yang diletakkan pada sejauh 0.4 m dari pusat massa menghasilkan persentasi yang paling besar dengan perbedaan yang cukup jauh. Sehingga didapatkan bahwa semakin jauh peletakkan CPVA, maka persentase reduksi respon yang dihasilkan pada daerah yang mendekati frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena frekuensi natural baru yang terbentuk semakin jauh bergeser dari frekuensi natural saat belum ditambahkan dengan CPVA.

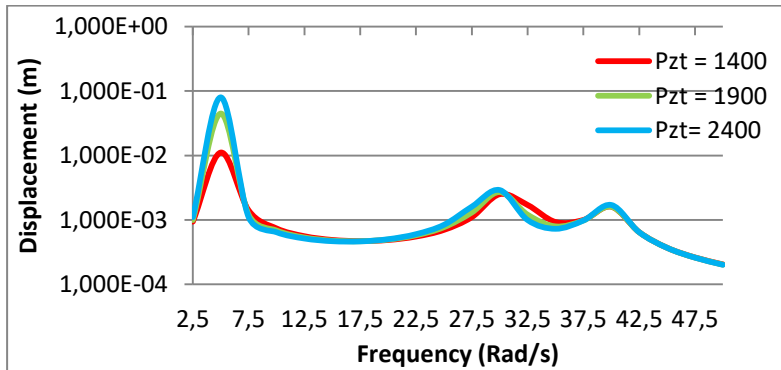
Dari tabel 4.8 dapat dilihat pada frekuensi-frekuensi tertentu menghasilkan persentase reduksi yang memiliki nilai negative, hal ini disebabkan karena respon yang dihasilkan sistem utama dengan CPVA lebih tinggi dibandingkan terhadap sistem utama tanpa CPVA pada frekuensi tersebut karna pengaruh dari massa, koefisien pegas sistem utama yang sudah berubah karena sudah ditambahkan CPVA dan pengaruh dari jarak sumber getar dan peletakkan CPVA terhadap pusat massa.

4.2.3. Analisa Sistem Utama Dengan CPVA dan Posisi CPVA Tetap

4.2.3.1. Analisa Respon Translasi Sistem Utama Dengan CPVA dan Posisi CPVA Tetap

Simulasi pemodelan yang dilakukan menggunakan dua variasi, yaitu variasi frekuensi operasi, variasi jumlah

piezoelectric, dengan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Variasi frekuensi yang digunakan pada sistem utama dengan CPVA ini adalah diantara 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 Rad/s. Variasi jumlah piezoelectric yang digunakan yaitu sebanyak 1400, 1900, dan 2400 buah.



Gambar 4.22 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Dengan CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric

Gambar 4.22 menunjukkan grafik RMS perpindahan sistem utama dengan CPVA dengan variasi frekuensi berbanding jumlah CPVA, sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1400 buah, garis hijau menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1900 buah, dan garis biru menunjukkan piezoelectric yang berjumlah.

Dari gambar 4.22 diketahui bahwa pada pemakaian piezoelectric sebanyak 1400 buah menghasilkan RMS perpindahan yang paling kecil dibandingkan dengan yang lainnya pada daerah frekuensi natural pertama.

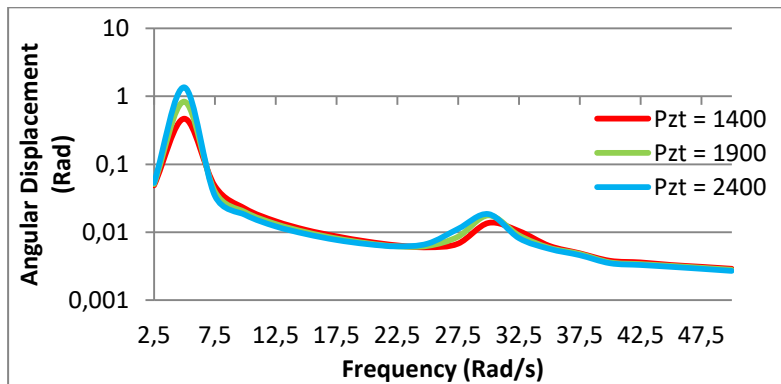
Sehingga semakin banyak piezoelectric yang digunakan, maka respon perpindahan yang dihasilkan akan semakin tinggi,

hal ini disebabkan karena piezoelectric merupakan DVA kedua yang disusun seri pada mekanisme CPVA yang membuat kinerja dari DVA pertama menjadi kurang efektif.

4.2.3.2. Analisa Respon Rotasi Sistem Utama Dengan CPVA dan Posisi CPVA Tetap

Simulasi pemodelan yang dilakukan menggunakan dua variasi, yaitu variasi frekuensi operasi, variasi jumlah piezoelectric, dengan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Variasi frekuensi yang digunakan pada sistem utama dengan CPVA ini adalah diantara 2.5 sampai 50 Rad/s dengan kelipatan 2.5 Rad/s. Variasi jumlah piezoelectric yang digunakan yaitu sebanyak 1400, 1900, dan 2400 buah.

Tabel 4.10 diatas menunjukkan respon perpindahan sudut dari massa utama dengan CPVA yang dipengaruhi oleh variasi jumlah piezoelectric dengan jumlah 1400, 1900, dan 2400 buah. Lalu dibuat grafik seperti gambar 4.23 dibawah ini



Gambar 4.23 Grafik RMS Perpindahan Sudut Sistem Utama Dengan CPVA Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric

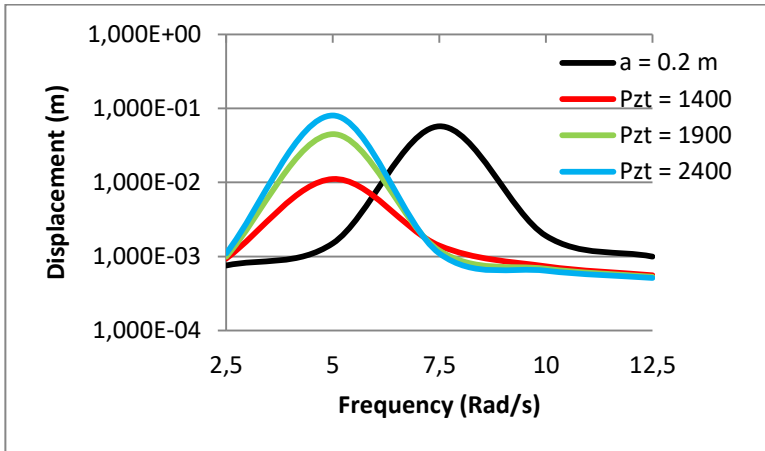
Gambar 4.23 menunjukkan grafik RMS perpindahan sudut sistem utama dengan CPVA dengan variasi frekuensi berbanding jumlah CPVA, sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1400 buah, garis hijau menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1900 buah, dan garis biru menunjukkan piezoelectric yang berjumlah.

Dari gambar 4.23 diketahui bahwa pada pemakaian piezoelectric sebanyak 1400 buah menghasilkan RMS perpindahan sudut yang paling kecil dibandingkan dengan yang lainnya pada daerah frekuensi natural pertama.

Sehingga semakin banyak piezoelectric yang digunakan, maka respon perpindahan sudut yang dihasilkan akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena piezoelectric merupakan DVA kedua yang disusun seri pada mekanisme CPVA yang membuat kinerja dari DVA pertama menjadi kurang efektif.

4.2.3.3. Analisa Reduksi Translasi Sistem Utama dengan CPVA

Setelah didapatkan RMS Respon getaran pada sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA, selanjutnya dilakukan analisa reduksi respon perpindahan sistem utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA. Analisa yang dilakukan yaitu dengan cara membandingkan respon perpindahan translasi sistem utama tanpa CPVA dengan sistem utama yang sudah diberi CPVA. Berikut adalah grafik perbandingan RMS perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA. Karena CPVA digunakan untuk mereduksi pada frekuensi natural pertama, maka yang dianalisa hanya di daerah frekuensi natural pertama system utama tanpa CPVA.



Gambar 4.24 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA

Gambar 4.24 menunjukkan grafik RMS perpindahan sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA, dimana CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Garis hitam merupakan RMS perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah, garis hijau menunjukkan jumlah piezoelectric sebanyak 1900 buah, dan garis biru menunjukkan piezoelectric sebanyak 2400 buah.

Selanjutnya dari gambar 4.24 itu dihitung persentase reduksi respon perpindahannya. Cara menghitung persentase reduksi pada frekuensi operasi 7.5 Rad/s dengan piezoelectric sebanyak 1400 buah yaitu dengan perhitungan sebagai berikut.

$$R = \frac{R_t - R_c}{R_t} \times 100\%$$

Dimana :

R : Persentase reduksi respon sistem utama dengan CPVA

R_t : Respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA
(0,0572 m)

R_c : Respon perpindahan sistem utama dengan CPVA
(0,0048 m)

Dengan perumusan diatas didapatkan

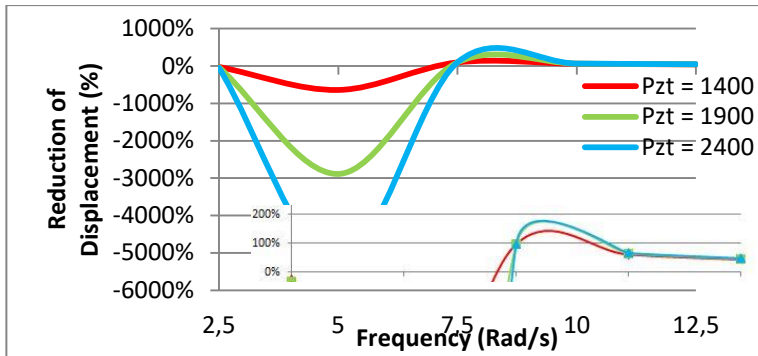
$$R = \frac{0,0572 - 0,0014}{0,0572} \times 100\% = 92\%$$

Dengan cara yang sama seperti diatas, didapatkan persentase reduksi respon perpindahan sistem utama dengan CPVA yang dibuat dalam tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Persentase Reduksi Respon Sistem Utama dengan CPVA

Persentase Reduksi Respon Sistem Utama Dengan CPVA			
Frequency (rad/s)	Reduksi RMS Displacement (%)		
	n = 1400	n = 1900	n = 2400
2,5	-24%	-31%	-46%
5	-640%	-2887%	-5233%
7,5	98%	98%	98%
10	61%	64%	66%
12,5	4%	47%	48%

Tabel 4.6 diatas menunjukkan persentase reduksi respon perpindahan dari massa utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya berada sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dari tabel 4.6 diatas lalu dibuat grafik seperti gambar 4.25 dibawah ini



Gambar 4.25 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.

Gambar 4.25 menunjukkan grafik persentase reduksi perpindahan sistem utama dengan CPVA. Garis merah menunjukkan persentase reduksi saat jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah, garis hijau menunjukkan persentase reduksi saat piezoelectric sebanyak 1900 buah, dan garis biru menunjukkan persentase reduksi saat piezoelectric yang digunakan sebanyak 2400 buah.

Terlihat dari gambar 4.25 bahwa persentase reduksi respon yang mendekati frekuensi natural pertama pada sistem utama tanpa CPVA dengan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah menghasilkan persentase reduksi yang besar dengan perbedaan nilai yang kecil. Namun pada daerah yang mendekati frekuensi natural kedua sistem utama tanpa CPVA, piezoelectric dengan jumlah 2400 buah memiliki persentase reduksi yang besar namun perbedaannya sangat kecil.

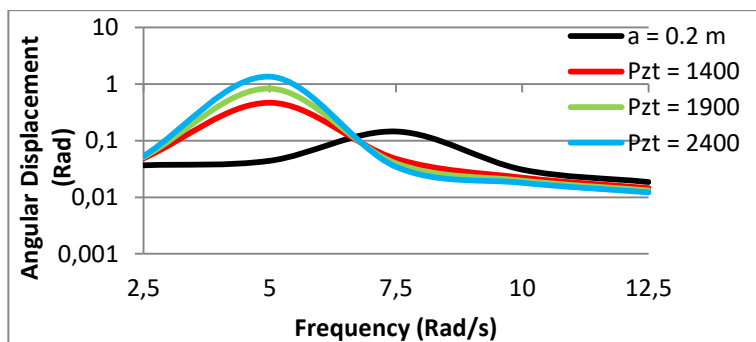
Sehingga didapatkan bahwa semakin jauh peletakkan CPVA, maka persentase reduksi respon yang dihasilkan pada daerah yang mendekati frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena piezoelectric merupakan DVA kedua yang disusun seri pada

mekanisme CPVA yang membuat kinerja dari DVA pertama menjadi kurang efektif.

Dari tabel 4.6 dapat dilihat pada frekuensi-frekuensi tertentu menghasilkan persentase reduksi yang memiliki nilai negative, hal ini disebabkan karena respon yang dihasilkan sistem utama dengan CPVA lebih tinggi dibandingkan terhadap sistem utama tanpa CPVA pada frekuensi tersebut karna pengaruh dari massa, koefisien pegas sistem utama yang sudah berubah karena sudah ditambahkan CPVA.

4.2.3.4. Analisa Reduksi Rotasi Sistem Utama dengan CPVA

Analisa yang dilakukan untuk mendapatkan reduksi rotasi sistem utama dengan CPVA yaitu dengan cara membandingkan respon perpindahan sudut sistem utama tanpa CPVA dengan sistem utama yang sudah diberi CPVA. Berikut adalah grafik perbandingan RMS perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA. Karena CPVA digunakan untuk mereduksi pada frekuensi natural pertama, maka yang dianalisa hanya di daerah frekuensi natural pertama system utama tanpa CPVA.



Gambar 4.26 Grafik RMS Perpindahan Sistem Utama Tanpa CPVA dan Sistem Utama dengan CPVA

Gambar 4.26 menunjukkan grafik RMS perpindahan sudut sistem utama tanpa CPVA dan sistem utama dengan CPVA, dimana CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Garis hitam merupakan RMS perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA yang sumber getarnya diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan perpindahan sudut saat piezoelectric berjumlah 1400 buah, garis hijau menunjukkan perpindahan sudut saat piezoelectric berjumlah 1900 buah, dan garis biru menunjukkan perpindahan sudut saat piezoelectric berjumlah 2400 buah pada sistem utama dengan CPVA.

Seperti translasi selanjutnya dihitung persentase reduksi respon perpindahan sudutnya. Cara menghitung persentase reduksi pada frekuensi operasi 10 Rad/s dengan jumlah piezoelectric 1400 buah yaitu dengan perhitungan sebagai berikut.

$$R_s = \frac{Rt_s - Rc_s}{Rt_s} \times 100\%$$

Dimana :

R_s : Persentase reduksi respon sistem utama dengan CPVA

Rt_s : Respon perpindahan sistem utama tanpa CPVA
(0,0308 rad)

Rc_s : Respon perpindahan sistem utama dengan CPVA
(0,0222 rad)

Dengan perumusan diatas didapatkan

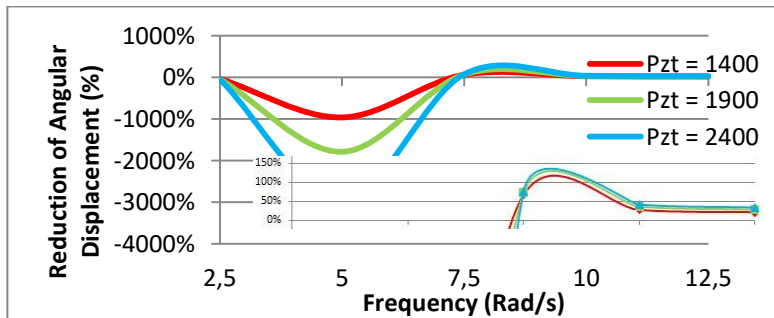
$$R = \frac{0,0308 - 0,0222}{0,0308} \times 100\% = 36\%$$

Dengan cara yang sama seperti diatas, didapatkan persentase reduksi respon perpindahan sudut sistem utama dengan CPVA yang dibuat dalam tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Persentase Reduksi Respon Angular Sistem Utama dengan CPVA

Reduksi Respon Sistem Utama Dengan CPVA			
Frequency (rad/s)	Reduksi RMS Displacement (%)		
	n = 1400	n = 1900	n = 2400
2,5	-33%	-39%	-45%
5	-961%	-1787%	-2965%
7,5	67%	73%	76%
10	28%	36%	42%
12,5	22%	29%	34%

Tabel 4.7 diatas menunjukkan persentase reduksi respon perpindahan sudut dari massa utama dengan CPVA yang dibandingkan dengan respon perpindahan sudut dari sistem utama tanpa CPVA yang piezoelectricnya berjumlah 1400, 1900, dan 2400 buah. Dari tabel 4.7 diatas lalu dibuat grafik seperti gambar 4.27 dibawah ini



Gambar 4.27 Grafik Persentase Reduksi Perpindahan Sistem Utama dengan CPVA.

Gambar 4.27 menunjukkan grafik persentase reduksi perpindahan sudut sistem utama dengan CPVA. Garis merah menunjukkan persentase reduksi saat piezoelectric berjumlah 1400 buah, garis hijau menunjukkan persentase reduksi saat piezoelectric berjumlah 1900 buah, dan garis biru menunjukkan persentase reduksi saat piezoelectric berjumlah 2400 buah.

Dari gambar 4.27 bahwa persentase reduksi respon yang mendekati frekuensi natural pertama pada jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah menghasilkan persentasi yang paling besar dengan perbedaan yang cukup jauh dengan nilai negtif, sedangkan respon yang mendekati frekuensi natural kedua sistem utama tanpa CPVA pada jumlah piezoelectric sebanyak 2400 buah menghasilkan persentasi yang paling tinggi dibanding yang lainnya.

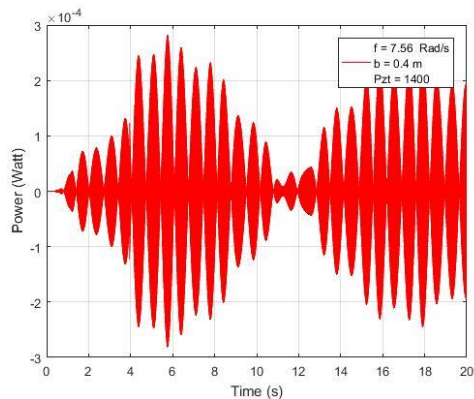
Sehingga didapatkan bahwa semakin banyak jumlah piezoelectric yang digunakan, maka persentase reduksi respon yang dihasilkan pada daerah yang mendekati frekuensi natural pertama akan semakin rendah, hal ini disebabkan karena piezoelectric merupakan DVA kedua yang disusun seri pada mekanisme CPVA yang membuat kinerja dari DVA pertama menjadi kurang efektif.

Dari tabel 4.7 dapat dilihat pada frekuensi-frekuensi tertentu menghasilkan persentase reduksi yang memiliki nilai negative, hal ini disebabkan karena respon yang dihasilkan sistem utama dengan CPVA lebih tinggi dibandingkan terhadap sistem utama tanpa CPVA pada frekuensi tersebut karna pengaruh dari massa, koefisien pegas sistem utama yang sudah berubah karena sudah ditambahkan CPVA dan pengaruh dari jarak sumber getar dan peletakkan CPVA terhadap pusat massa.

4.3. Analisa Energi Bangkitan

Setelah didapatkan Respon RMS perpindahan dan persentase reduksi respon perpindahan, selanjutnya adalah melakukan analisa energi bangkitan yang ada pada sistem utama tersebut. Variasi yang digunakan ada tiga, yaitu variasi frekuensi operasi, variasi peletakkan CPVA, dan variasi jumlah piezoelectric yang digunakan. Karena sifat DVA baik digunakan untuk meredam frekuensi yang konstan, maka variasi frekuensi yang digunakan yaitu pada frekuensi natural pertama dan kedua dari sistem utama tanpa CPVA. Variasi posisi peletakkan CPVA yaitu ketika CPVA diletakkan di pusat massa, digeser 0.2 m dari pusat massa, dan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Dan variasi jumlah piezoelectric yang digunakan adalah sebanyak 1400, 1900, dan 2400 buah.

Gambar 4.26 dibawah ini merupakan hasil energi bangkitan berupa voltase dan daya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah.

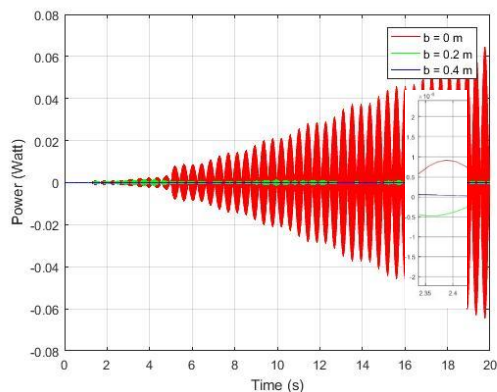


Gambar 4.28 Grafik Respon Energi Bangkitan Berupa Daya.

Gambar 4.28 diatas adalah grafik energi bangkitan berupa daya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah. Gambar 4.28 merupakan energi bangkitan berupa daya.

4.3.1. Analisa Energi Bangkitan dengan Jumlah Piezoelectric Tetap

Variasi yang digunakan pada pemodelan sistem utama tanpa CPVA ini menggunakan dua macam variasi yaitu variasi frekuensi operasi, dan variasi peletakkan posisi CPVA yang menggunakan jumlah piezoelectric sebanyak 1400 buah. Variasi frekuensi operasi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 7,56 dan 38.16 Rad/s yang merupakan frekuensi natural pertama dan kedua sistem utama tanpa CPVA. Variasi peletakkan posisi CPVA pada penelitian ini ada tiga, yaitu saat CPVA diletakkan pada pusat massa, digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan diletakkan pada 0.4 m dari pusat massa.



Gambar 4.29 Grafik Respon Daya Bangkitan Dengan Variasi Peletakkan CPVA Terhadap Pusat Massa.

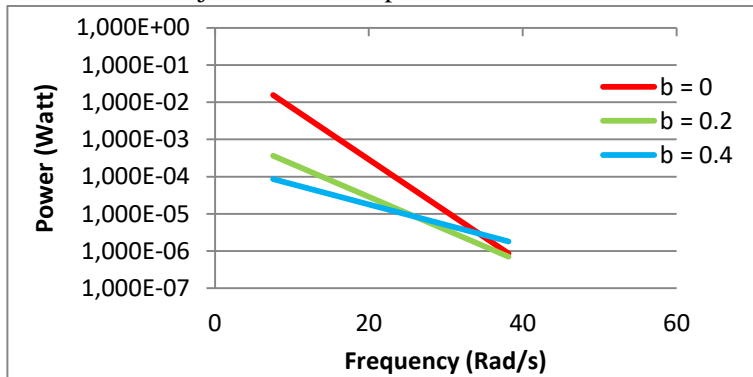
Gambar 4.29 diatas merupakan grafik daya bangkitan yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA yang disimulasikan dengan frekuensi operasi sebesar 7.56 Rad/s, dengan piezoelectric yang berjumlah 1400, dan peletakkan CPVA terhadap pusat massa yang bervariasi. Garis merah merupakan daya bangkitan dimana CPVA diletakkan pada pusat massa. Garis hijau merupakan daya bangkitan dimana CPVA digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa. Dan garis biru merupakan daya bangkitan dimana CPVA digeser sejauh 0.4 m dari pusat massa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa semakin jauh pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa, maka responnya akan semakin menurun.

Tabel 4.8 Energi Bangkitan dengan Jumlah Piezoelectric Tetap

RMS Energi Bangkitan			
Frequency (rad/s)	Tegangan (Volt)		
	b = 0	b = 0.2	b = 0.4
7,56	4,900E-02	9,228E-03	1,483E-03
38,16	4,763E-04	2,360E-04	1,366E-04
	Arus (Ampere)		
	b = 0	b = 0.2	b = 0.4
7,56	2,498E-01	3,961E-02	5,635E-02
38,16	1,835E-03	2,978E-03	1,322E-03
	Daya (Watt)		
	b = 0	b = 0.2	b = 0.4
7,56	1,560E-02	3,649E-04	8,601E-05
38,16	8,637E-07	7,093E-07	1,815E-06

Tabel 4.8 diatas menunjukkan energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dipengaruhi oleh jarak peletakkan

sumber getar saat diletakkan di pusat masa, digeser sejauh 0.2 m, dan diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.



Gambar 4.30 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA

Gambar 4.30 menunjukkan grafik daya bangkitan dengan variasi frekuensi berbanding posisi posisi CPVA. Garis merah menunjukkan saat CPVA diletakkan pada pusat massa, garis hijau menunjukkan CPVA yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa, dan garis biru menunjukkan CPVA yang diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa.

Dari gambar 4.30 diketahui bahwa pada saat CPVA diletakkan pada pusat massa memiliki daya bangkitan yang lebih tinggi dibanding dengan yang lainnya pada frekuensi natural pertamanya, hal ini disebabkan karena frekuensi natural baru yang terbentuk nilainya sama dan menghasilkan displacement yang lebih besar, sehingga menghasilkan energi listrik yang besar, namun tidak direkomendasikan CPVA diletakkan dipusat massa karena tidak menghasilkan reduksi, hal ini disebabkan karena RMS displacement setelah diberi CPVA lebih tinggi dibandingkan saat belum diberi CPVA, selain itu juga dapat menyebabkan kerusakan pada piezoelectric karena defleksi yang sangat tinggi. Pada frekuensi natural kedua, daya bangkitan

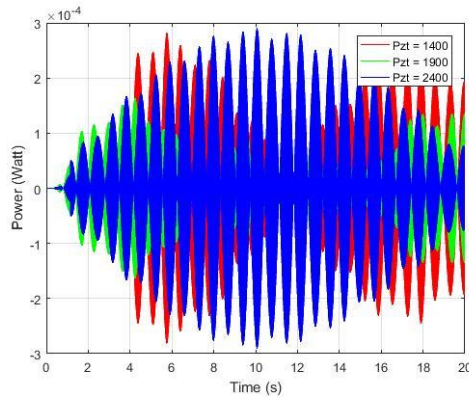
terbesar ada pada saat CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa dibanding dengan yang lainnya, hal ini disebabkan karena RMS perpindahan yang dihasilkan pada saat CPVA diletakkan sejauh 0.4 menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibanding lainnya karena dipengaruhi oleh pergeseran frekuensi natural baru yang terbentuk.

Sehingga semakin jauh pergeseran frekuensi natural baru yang terbentuk dari frekuensi operasi, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin rendah. Sedangkan semakin dekat frekuensi natural baru yang terbentuk dari frekuensi operasi, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan tinggi.

4.3.2. Analisa Energi Bangkitan dengan Posisi CPVA tetap

Simulasi pemodelan yang dilakukan menggunakan dua variasi, yaitu variasi frekuensi operasi, variasi jumlah piezoelectric, dan dengan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Variasi frekuensi operasi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 7,56 dan 38.16 Rad/s yang merupakan frekuensi natural pertama dan kedua sistem utama tanpa CPVA. Variasi jumlah piezoelectric yang digunakan yaitu sebanyak 1400, 1900, dan 2400 buah.

Berikut adalah contoh hasil energi bangkitan berupa daya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi sebesar 7.56 Rad/s, CPVA diletakkan sejauh 0.4 meter dari pusat massa, dan jumlah piezoelectric bervariasi sebanyak 1400, 1900, dan 2400 buah.



Gambar 4.31 Grafik Respon Daya Bangkitan Dengan Variasi Jumlah CPVA Terhadap Pusat Massa.

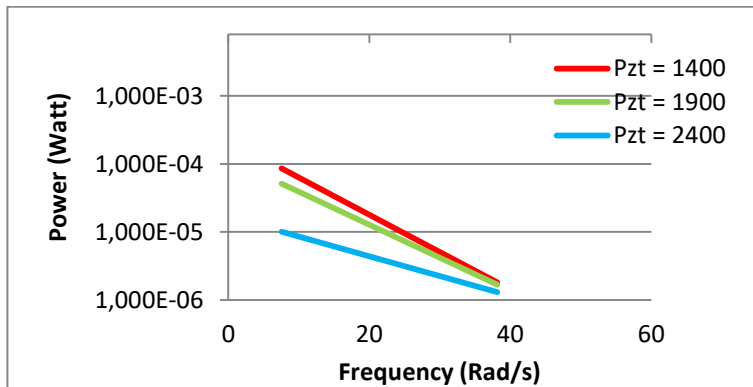
Gambar 4.31 diatas merupakan grafik daya bangkitan yang ditunjukkan oleh massa utama dengan CPVA yang disimulasikan dengan frekuensi operasi sebesar 7.56 Rad/s, dengan peletakkan CPVA sejauh 0.4 m dari pusat massa, dan piezoelectric bervariasi jumlahnya. Garis merah merupakan daya bangkitan massa utama dimana piezoelectric berjumlah 1400 buah. Garis hijau merupakan daya bangkitan massa utama dimana piezoelectric berjumlah 1900 buah. Dan garis biru merupakan daya bangkitan massa utama dimana piezoelectric berjumlah 2400 buah. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa semakin banyak jumlah piezoelectric yang digunakan, maka responnya akan semakin menurun.

Tabel 4.9 Energi Bangkitan dengan Posisi CPVA Tetap

RMS Energi Bangkitan			
Frequency (rad/s)	Tegangan (Volt)		
	1400	1900	2400
7,56	1,483E-03	1,425E-03	9,556E-04

38,16	1,366E-04	3,909E-04	1,842E-04
Arus (Ampere)			
	1400	1900	2400
7,56	5,635E-02	3,564E-02	1,024E-02
38,16	1,322E-03	4,220E-03	7,027E-03
Daya (Watt)			
	1400	1900	2400
7,56	8,601E-05	5,128E-05	1,008E-05
38,16	1,815E-06	1,683E-06	1,306E-06

Tabel 4.9 diatas menunjukkan energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dipengaruhi oleh variasi jumlah piezoelectric dengan jumlah 1400, 1900, dan 2400 buah. Lalu dibuat grafik seperti gambar 4.32 dibawah ini



Gambar 4.32 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Piezoelectric

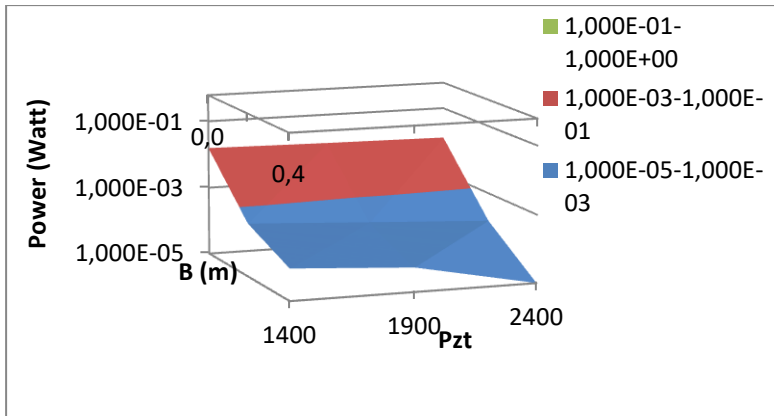
Gambar 4.32 menunjukkan grafik voltase bangkitan sistem utama dengan CPVA dengan variasi frekuensi berbanding jumlah CPVA, sumber getar diletakkan sejauh 0.2 m dari pusat

massa, dan posisi CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa. Garis merah menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1400 buah, garis hijau menunjukkan piezoelectric yang berjumlah 1900 buah, dan garis biru menunjukkan piezoelectric yang berjumlah.

Dari gambar 4.32 diketahui bahwa pada pemakaian piezoelectric sebanyak 2400 buah menghasilkan RMS perpindahan yang paling kecil dibandingkan dengan yang lainnya pada frekuensi natural pertama dan kedua sistem utama tanpa CPVA, hal ini disebabkan karena RMS perpindahan yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan yang lainnya karena efek pergeseran frekuensi natural baru yang terbentuk dan efek pemakaian piezoelectric yang semakin banyak menyebabkan kinerja DVA terganggu.

Sehingga semakin banyak piezoelectric yang digunakan, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin rendah, hal ini disebabkan karena RMS perpindahan yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan yang lainnya karena efek pergeseran frekuensi natural baru yang terbentuk dan efek pemakaian piezoelectric yang semakin banyak menyebabkan kinerja DVA terganggu.

Dari tabel 4.8 dan 4.9 dengan frekuensi sebesar 7.56 Rad/s apabila grafik dibuat tiga dimensi, akan menghasilkan seperti gambar 4.33 berikut



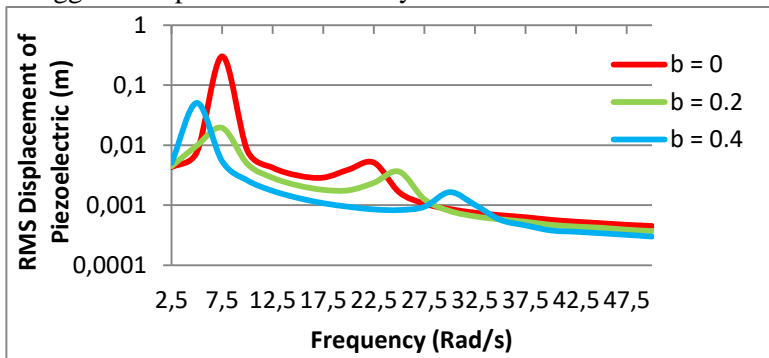
Gambar 4.33 Grafik Daya Bangkitan dengan Variasi Frekuensi, Jumlah Piezoelectric, dan Posisi CPVA

Dari gambar 4.33 diatas dapat diketahui bahwa semakin banyak penggunaan piezoelectricnya maka energy bangkitan yang dihasilkan akan semakin kecil, hal ini disebabkan karena reduksi yang dihasilkan semakin kecil, sehingga gerak dari piezoelectric akan tidak maksimal dan tidak dapat menghasilkan energy bangkitan yang maksimal. Begitu juga dengan peletakkan CPVA nya, semakin jauh peletakkan CPVA nya maka energy bangkitannya akan semakin sedikit, hal ini disebabkan karena frekuensi natural baru yang terbentuk sudah bergeser jauh dari frekuensi natural awal, sehingga displacement yang dihasilkan akan kecil dibandingkan dengan CPVA yang diletakkan di dekat dengan pusat massa yang menghasilkan frekuensi natural baru yang dekat dengan frekuensi operasi.

Dari penelitian ini untuk mendapatkan persentase redaman dan energi listrik yang tinggi, maka sumber getar diletakkan pada titik yang jauh dari pusat massa, begitu pula dengan peletakkan CPVA nya yang diletakkan sejauh mungkin dari pusat massa, pada penelitian ini yaitu sejauh 0.4 m. Namun energy bangkitan yang dihasilkan tidak akan tinggi karena

pergerakan dari piezoelectricnya tidak optimal yang disebabkan karena displacementnya rendah.

Untuk melihat energi bangkitan yang optimum yang dihasilkan oleh CPVA, perlu dilihat RMS perpindahan dari piezoelectric tersebut, berikut ini adalah RMS displacement dari piezoelectric dengan variasi frekuensi dan peletakkan CPVA yang menggunakan piezoelectric sebanyak 1400 buah.



Gambar 4.34 Grafik RMS Displacement Piezoelectric dengan Variasi Frekuensi Dan Posisi CPVA

Gambar 4.36 RMS displacement piezoelectric yang dihasilkan dengan variasi frekuensi operasi dan posisi CPVA. Dari gambar diatas diketahui bahwa saat CPVA diletakkan di pusat massa atau saat digeser sejauh 0.2 meter dari pusat massa pada frekuensi operasi sebesar 7.5 rad/s menghasilkan displacement yang nilainya lebih dari 6 mm, hal ini tidak direkomendasikan karena dapat merusak material piezoelectric. Sehingga pada frekuensi tersebut, peletakkan CPVA yang optimal berada pada sejauh 0.4 m dari pusat massa. Selain itu dari grafik diketahui juga peletakkan CPVA yang optimum untuk menghasilkan energi bangkitan yang nilainya pada frekuensi tertentu dengan peletakkan CVPVA tertentu dengan piezoelectric berjumlah 1400 buah.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian yang sudah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Telah dirancang sistem utama sebagai sumber getar dengan dimensi 50x50x80cm. Getaran yang terjadi pada sistem ini memiliki arah translasi dan Rotasi karena peletakkan sumber getar yang digeser sejauh 0.2 m dari pusat massa searah sumbu horizontal.
2. Telah dirancang Cantilever Piezoelectric Vibration absorber (CPVA) dengan dimensi 22x21x30 cm yang mampu menampung 1760 buah Piezoelectric. Sistem ini berfungsi untuk mereduksi getaran dan translasi dan rotasi pada sistem utama dengan arah vertikal dan dapat menghasilkan energy bangkitan listrik
3. Didapatkan bahwa semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa maka, frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar, namun semakin rendah RMS perpindahannya. Sedangkan pada frekuensi natural kedua efek pergeseran dari posisi sumber getar tidak terlalu berpengaruh. Selain itu semakin jauh pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, maka RMS perpindahan sudut yang ada di daerah frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar.
4. Didapatkan bahwa semakin jauh pergeseran letak CPVA terhadap pusat massa, maka frekuensi natural pertama, dan RMS perpindahan yang terbentuk akan kecil. Sedangkan pada frekuensi natural kedua, semakin jauh peletakkan CPVA terhadap pusat massa akan menghasilkan frekuensi natural kedua yang lebih besar, namun RMS perpindahannya akan semakin kecil. Selanjutnya pada frekuensi natural ketiga dan keempat pergeserannya tidak terlalu dipengaruhi oleh posisi

sumber getar dan posisi CPVA terhadap pusat massa. Selain itu didapatkan bahwa semakin dekat pergeseran posisi sumber getar terhadap pusat massa, maka RMS perpindahan sudut yang ada di daerah frekuensi natural pertama yang terbentuk akan semakin besar.

5. Didapatkan bahwa semakin jauh peletakkan CPVA, maka persentase reduksi respon yang dihasilkan pada daerah yang mendekati frekuensi natural pertama sistem utama tanpa CPVA akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena frekuensi natural baru yang terbentuk semakin jauh bergeser dari frekuensi natural saat belum ditambahkan dengan CPVA. Begitu pula pada persentase reduksi rotasinya.
6. Semakin banyak piezoelectric yang digunakan, maka respon perpindahan yang dihasilkan akan semakin tinggi, hal ini disebabkan karena piezoelectric merupakan DVA kedua yang disusun seri pada mekanisme CPVA yang membuat kinerja dari DVA pertama menjadi kurang efektif.
7. Frekuensi operasi yang semakin mendekati frekuensi natural akan menyebabkan perpindahan yang semakin besar. Hal ini menyebabkan energi bangkitan semakin bertambah, daya bangkitan yang direkomendasikan dan terbesar yang mampu dihasilkan oleh CPVA sebesar $1.483E-03$ volt dengan reduksi sebesar 95.37% yaitu saat CPVA diletakkan sejauh 0.4 m dari pusat massa dengan piezoelectric berjumlah 1400 buah.

5.2. Saran

Saran yang direkomendasikan dari penelitian yang sudah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, disarankan untuk tidak meletakkan CPVA pada frekuensi operasi yang besarnya sama dengan frekuensi natural baru dari sistem utama, karena displacement yang dihasilkan akan semakin besar dibandingkan sebelum ditambahkan dengan CPVA.

2. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disarankan untuk tidak menggunakan Cantilever Piezoelectric karena akan mengurangi reduksi dari absorber yang menyebabkan reduksi yang dihasilkan akan menurun, dan energi yang dihasilkan tidak banyak dengan jumlah piezoelectric yang digunakan lebih dari 1000 buah. Sehingga apabila dilihat dari segi ekonomi, penggunaan piezoelectric tidak ekonomis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

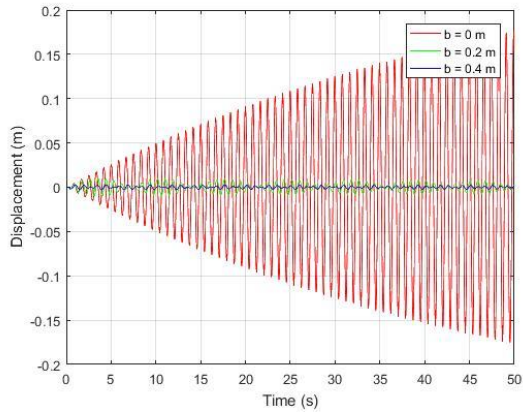
1. *Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber - A Simulation Approach*. **Pachpute, A. Z. and Bawa, P. B.** 2016.
2. **Hibbeler, R.C.** *Engineering Mechanics Dynamic*. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2010.
3. *Experimental study of optimum piezoelectric energy harvester circuit under various excitations*. **Rafiei, Mir Mesyam.** 2016.
4. *Dynamic characterization of small fibers based on the flexural vibrations of a piezoelectric cantilever probe*. **Zhang, Xiaofei, Ye, Xuang and Li, Xide.** 2016.
5. *Energy Analysis of a Mechanical System with a Dynamic Vibration Absorber*. **Dobry, Marian Witalis.** 2016, *Vibrations in Physical System*.
6. *Studi Pengaruh Massa dan Perubahan Lengan Momen Dual Dynamic Vibration Absorber (DVA)-Independent Terhadap Respon Getaran Sisten Utama 2-Dof*. **Kusumadewayanti, Esthi.** 2015.
7. *Studi Perbandingan pengaruh Penambahan SDVA dan DDVA Tersusun Seri Terhadap Respon Getaran Translasi Sistem Utama*. **Lostari, Aini.** 2015.
8. *Pemodelan Dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi Pada Sistem Utama Dan Energi Listrik Yang Dihasilkan Oleh Mekanisme Dynamic Vibration Absorber Metode Cantilever Piezoelectric (CPVA)*. **Efendy, Wahyu Rachma.** 2016.
9. **S. Rao, Singiresu.** *Mechanical Vibrations*. Singapore : Prentice Hall, 2004.

10. *Pemodelan dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Mekasnisme Ocean Wave Energy Harvester Tipe Pelampung Bola Mnggunakan Metode Cantilever Piezoelectric*. **Firdaus, Zulfan Wildan**. 2015.

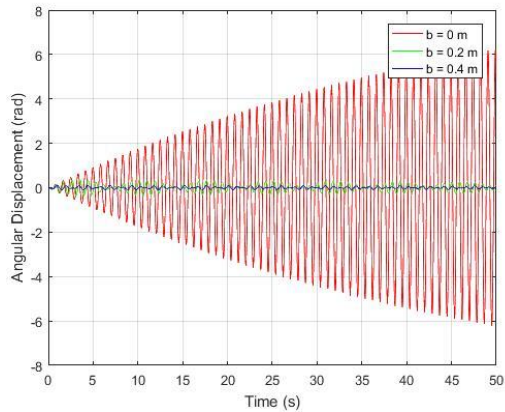
LAMPIRAN

Hasil simulasi matlab Simulink

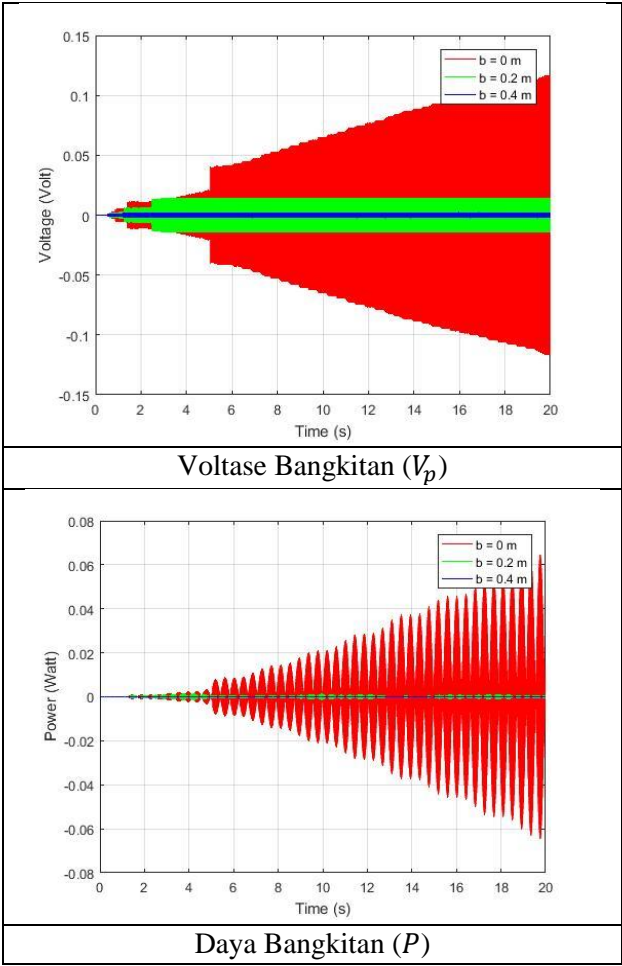
Frekuensi 7.56 Rad/s. Jumlah PZT 1400



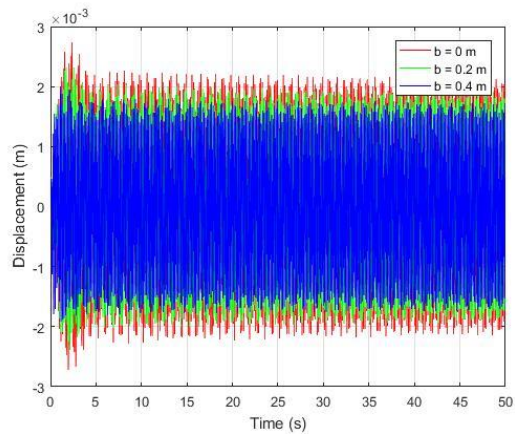
Perpindahan Massa Utama (X_1)



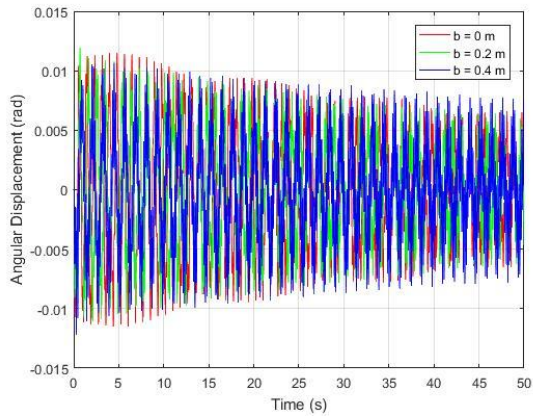
Perpindahan Sudut Massa Utama (θ_2)



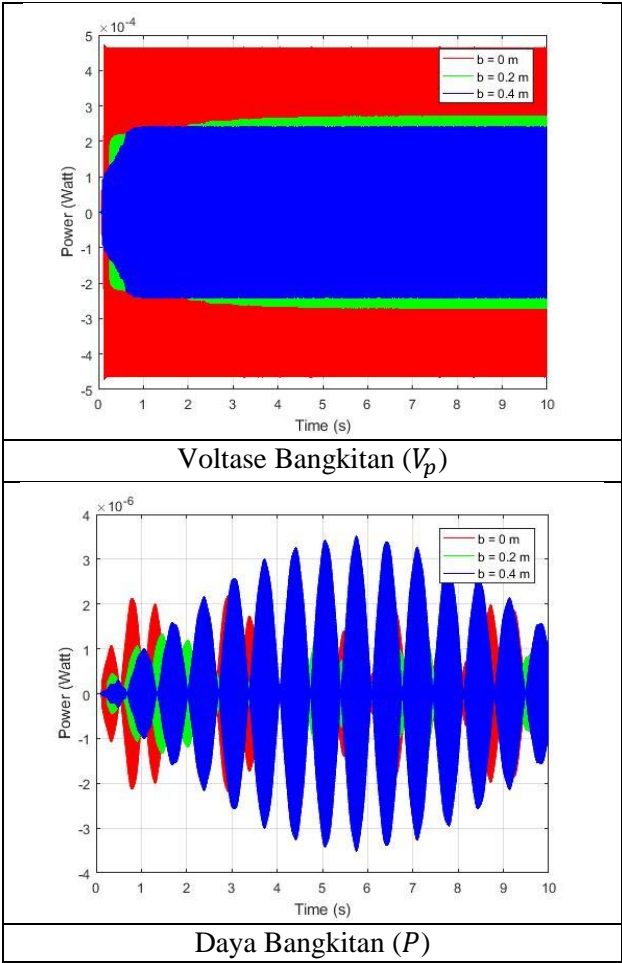
Frekuensi 38.16 Rad/s. Jumlah PZT 1400



Perpindahan Massa Utama (X_1)



Perpindahan Sudut Massa Utama (θ_2)



BIODATA PENULIS



Wisnu Gilang Romadhon

Arifiyanto dilahirkan di Karanganyar pada 8 Februari 1995 dari orangtua yang bernama Muhyiddin Arifiyanto dan Siti Munawaroh. Penulis menghabiskan masa kanak-kanak dan tumbuh bersama satu orang adik perempuan yang bernama Indriyana Putri Arifiyanto. Pendidikan formal yang ditempuh penulis dimulai dari SD Bani Saleh 1 Bekasi tahun 2001-2007. Kemudian

dilanjutkan ke SMP Negeri 12 Bekasi pada tahun 2007-2010 dan SMA Negeri 2 Bekasi pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi negeri di kota Surabaya yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil departemen Teknik Mesin ITS S1 melalui jalur SBMPTN.

Penulis sangat aktif dalam kegiatan akademik dan non akademik selama berkuliah di ITS Surabaya. Penulis pernah menjadi asisten Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis di bidang akademik. Di bidang non akademik, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Mesin dengan memegang jabatan sebagai staff departemen hubungan luar pada tahun 2014-2015, dan menjadi kabirolasi dan alumni departemen hubungan luar pada tahun 2015-2016 dengan menghasilkan banyak kontribusi. Selanjutnya penulis juga menjadi coordinator Lab Vibrasi dan Sistem dinamis pada tahun 2016-2017. Selain itu penulis menghasilkan banyak prestasi untuk Teknik Mesin ITS di bidang Olahraga, khususnya badminton yang berhasil membawa nama Teknik Mesin untuk juara setiap tahunnya dari tahun 2014-2017 di tingkat ITS.

Motto hidup penulis adalah “*Continuous and Neverending Improvement*” atau yang biasa disebut istiqomah,

yang menjadikan penulis untuk selalu berusaha lebih bai setiap harinya, karena tiada yang lebih berharga dibandingkan dengan waktu. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email wisnugilang137@gmail.com